

République Algérienne Démocratique et Populaire

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique**



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude

Présenté pour l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Génie mécanique

Spécialité: Maintenance des équipements industriels

Thème

Etude technologique de l'appareil de fluage

Devant le jury composé de :Présenté par :

.....	Président	-BAHDI Atman
.....	Examineur	- DJEDIDI Choab
.....	Examineur	- KHENFER Mohemmed Toufik
LAOUINI Abdel Djalil	Encadreur	

2014-2015

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued



FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE

Mémoire de fin d'étude Présenté pour

l'obtention du diplôme de

LICENCE ACADEMIQUE

Domaine: Sciences et Technologies

Filière: Génie mécanique

Spécialité: Maintenance des équipements industriels

Thème

Etude technologique de l'appareil de fluage

Devant le jury composé de :Présenté par :

.....

Président

-BAHDI Atman

.....

Examineur

- DJEDIDI Choab

.....

Examineur

- KHENFER Mohemmed Toufik

LAOUINI Abdel Djalil

Encadreur

2014-2015

Remerciements



Mes remerciement vont tout premièrement à dieu tout puissant pour la volonté, la santé et la patience, qu'il ma donné durant toutes ces années d'études.

*Je tiens aussi à exprimer ma profonde gratitude et mes remerciements les plus sincères à **Même LAOUINI.A.ELDJALIL, enseignante** à l'université de **HAMMA LAKHDER EL OUED** et directrice de mon mémoire, pour m'avoir encadré, initié à la recherche et pour sa patience et soutien permanent. J'ai tout particulièrement apprécié ses encouragements et ses conseils qui m'ont été très précieux et qui m'ont permis de mener à bien mon travail.*

Nous remercions tous de l'aide pour nous Je remercie mes très chers amis (es) pour leurs soutiens.

Mes remerciements vont également à tous mes enseignants qui ont contribués à ma formation, et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.

sommaire

Sommaire

Introduction générale	1
Chapitre I : Structure, déformation et mise en forme	
I.1 Introduction	2
I.2 Microstructures des matériaux.....	2
I.2.1 Liaison atomique.....	2
I.2.1.1 Liaison covalente.....	3
I.2.1.2 Liaison ionique.....	3
I.2.1.3 Liaison métallique	5
I.3 Structure cristalline des métaux.....	6
I.3.1 Les principaux types de défauts cristallins	8
I.3.1.1 Les défauts ponctuels (de dimension nulle ou 0 dimension)	8
I.3.1.2 Les défauts étendus	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.4 Déformation.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.4.1 Déformation élastique	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.4.2 La déformation plastique	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.4.4 Types de déformations.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 Procédés de mise en forme de cuivre	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 .1 Laminage.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 .1.1 Définition	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 .1.2 Principe.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 .2 Tréfilage.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 .2 .1 Définition	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 .2 .2 Tréfileuses	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 .2 .3 Principe.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5 .2 .4 Utilisation des savons.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.
I.5.2.5 Machine de tréfilage.....	خطأ! الإشارة المرجعية غير معرفة.

Chapitre II : Les Essais Mécaniques

CHAPITRE II.....	31
II.1 Généralités	31
II.2 Essai de dureté	31
II.2.1 Définition de dureté	31
II.2.2 Principe de l'essai de pénétration	31
II.2.3 Procédé avec action statique	32
II.3 Essai de traction.....	32
II.3.1 But d'essai	32
II.3.2 Principe	33
II.3.3 Eprouvettes	33
II.3.4 Machine d'essai	33
II.3.5 Diagramme de traction.....	34
II.3.6 Caractéristiques de l'essai.....	35

Chapitre III : Description de l'appareil réalisé

III.1 Description de la machine de fluage.....	37
III.2 Conception de la machine	38
III.2.1 Bâti	39
III.2.1.1 La base	39
III.2.1.2 Le support	39
III.2.2 Bras de levier.....	40
III.2.2 Mors mobile et mors fixe	41
III.2.4 Axe et pignon	43
III.2.5 Couvercle de roulement	45
III.2.6 Roulement	47
III.2.7 Four électrique.....	48
III.2.7.1 Conception du four	50
III.2.8 Thermorégulateur	51
III.2.9 Système d'acquisition	51

III.3 Etude de la résistance.....	52
III.3.1 Etude de la résistance à la flexion du bras de levier.....	52
III.3.2 La condition de résistance de bras de levier:.....	53
III.3.3 Etude de la résistance au cisaillement de l'axe de l'articulation:.....	57
III.3.4 Etude de la résistance au cisaillement de l'axe de transmission:.....	58
III.3.5 Etude de la résistance au cisaillement de la vis d'anneau :.....	59

Conclusion général

Notations

T_f : Température de fusion en Kelvin

ϵ : Déformation

$\dot{\epsilon}$: Vitesse de fluage

Ω : Volume atomique

d : Dimension caractéristique des grains

D : Coefficient d'autodiffusion.

μ : Potentiel chimique des atomes

J : Flux d'atome transporté.

Q_c : Energie d'activation de fluage

G : Module de cisaillement

B : Vecteur de Burgers des dislocations.

ϵ_m : vitesse minimale

σ_e : contrainte de limite d'élasticité

σ_R : contrainte de résistance à la rupture.

A% : Allongement

E : module d'élasticité (module de Young)

R : constant de gaz parfait

n : exposant de contrainte.

p : exposant de la taille de grain

t_f : temps de rupture

Liste des Figures

<i>Figure I.1 : Représentation schématique d'une liaison covalente dans une molécule de méthane (CH₄).....</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.2 : Exemple de liaisons covalente la molécule de dichorée Cl₂</i>	<i>4</i>
<i>Figure I.3 : Représentation schématique de liaisons ioniques dans du chlorure de sodium (Na Cl).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.4 : Exemple de liaisons ionique chlorure de sodium (Na Cl).....</i>	<i>5</i>
<i>Figure I.5 : Représentation schématique de liaisons métalliques.....</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.6 : Exemple de liaisons métalliques cristal de sodium Na</i>	<i>6</i>
<i>Figure I.8 : La structure cristalline cubique centrée.....</i>	<i>7</i>
<i>Figure I.9 : La structure cristalline cubique à faces centrées.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.10 : La structure cristalline hexagonale compacte.....</i>	<i>8</i>
<i>Figure I.11 : Défaut ponctuel simple la lacune ou défauts de SCHOTTKY.....</i>	<i>9</i>
<i>Figure I.12 : Défaut ponctuel simple atomes interstitiels ou défauts de FRENKEL... </i>	<i>10</i>
<i>Figure I.13 : Défaut ponctuel simple la substitution, solutions solides désordonnée.....</i>	<i>10</i>
<i>Figure I.14 : Défaut ponctuel simple la substitution, solutions solides ordonnée....</i>	<i>11</i>
<i>Figure I.15: Observation en microscopie à transmission de lignes de dislocation dans un acier inoxydable 316 L.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.16 : (a) Cristal parfait, (b) Dislocations coin, (c).Dislocations vis.....</i>	<i>13</i>
<i>Figure I.17 : vecteur de BURGERS d'une dislocation.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.18 : Poly cristal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains et d'un joint de phases.....</i>	<i>14</i>
<i>Figure I.19 : Schématisation à deux dimensions d'un joint de macle. Le cristal maclé et le cristal mère sont identiques à une symétrie près</i>	<i>15</i>

<i>Figure I.20 : Glissement dans les éprouvettes</i>	17
<i>Figure I.21 : Blocs de cellules et murs denses de dislocations</i>	19
<i>Figure I.22 : Structure de cellules de dislocations dans un alliage d'aluminium</i>	20
<i>Figure I.23 : Recristallisation dynamique : a) structure déformée restaurée et non recristallisée; b) germination de nouveaux grains; c) grains à des niveaux différents d'écrouissage; d) exemple d'une microstructure d'un acier austénitique présentant des grains écrouis et recristallisés</i>	22
<i>Figure I.24 : Schéma des trains de laminaires</i>	23
<i>Figure I.25 : Schéma de principe de laminage</i>	24
<i>Figure I.26 : Schéma d'un banc à tréfiler</i>	25
<i>Figure I.27 : Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées</i>	26
<i>Figure I.28 : Schéma de principe de tréfilage</i>	27
<i>Figure I.29 : savonnier</i>	27
<i>Figure I.30 : Evolution de la rhéologie du savon lors d'une opération de tréfilage élémentaire</i>	28
<i>Figure I.31 : Bancs de tréfilage multi passe de l'EN.I.CA.B</i>	29
<i>Figure II. 1 : Exemple d'une éprouvette de traction</i>	33
<i>Figure II.2 : Machine de traction</i>	34
<i>Figure II.3 : Diagramme de traction</i>	35
<i>Figure III.1 : Schéma d'une machine de fluage</i>	38
<i>Figure III.2 : Dessin d'ensemble du bâti</i>	41
<i>Figure III.2 : Dessin d'ensemble du bâti</i>	42
<i>Figure III.5 : Dessin de définition des anneaux des mors mobile et fixe</i>	43
<i>Figure III.6 : Dessin de définition d'axe de transmission</i>	44
<i>Figure III.7 : Dessin de définition de pignon</i>	45

<i>Figure III.8 : Dessin de définition de couvercle.....</i>	<i>46-47</i>
<i>Figure III.9 : Dessin de définition de roulement.....</i>	<i>48</i>
<i>Figure III.10 : Dessin de four.....</i>	<i>50</i>
<i>Figure III.11 : Le four électrique.....</i>	<i>51</i>
<i>Figure III.12 : Thermorégulateur.....</i>	<i>52</i>
<i>Figure III.13 : Schéma de la machine de fluage.....</i>	<i>53</i>
<i>Figure III.14 : Schéma représentatif des forces appliquées sur le bras de levier.....</i>	<i>54</i>
<i>Figure III.15 : Diagramme d'effort tranchant.....</i>	<i>56</i>
<i>Figure III.16 : Diagramme de moment fléchissant.....</i>	<i>57</i>
<i>Figure III.17 : Schéma représentative la force appliqué sur l'axe d'articulation de bras de levier.....</i>	<i>58</i>
<i>Figure III.18 : Schéma représentative de force applique sur l'axe transmission.....</i>	<i>59</i>
<i>Figure III.19 : schéma représentative de force applique sur les vis des anneaux</i>	<i>60</i>

Liste de tableaux

<i>Tableau II.1 : Tableau pénétrateurs Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop.....</i>	<i>32</i>
---	-----------

INTRODUCTION GENERAL

Le fluage est un mode d'endommagement lent et progressif qui a conduit par le passé à plusieurs accidents industriels importants. L'accident le plus catastrophique s'est produit à Bhopal, Inde en décembre 1984 et a causé la mort de plus de trois mille personnes. Cet accident a été attribué à la rupture par fluage d'une tuyauterie transportant un fluide toxique sous pression et à haute température.

Les lignes aériennes constituent le moyen actuel le plus économique de transport de l'énergie électrique à grande distance. Grâce à sa conductivité exceptionnelle, le cuivre a longtemps été un matériau très apprécié dans la mise en œuvre des lignes aériennes. Seulement, la bonne résistance au fluage des câbles électriques est exigée.

Les lignes aériennes constituent le moyen actuel le plus économique de transport de l'énergie électrique à grande distance. Grâce à sa conductivité exceptionnelle, le cuivre a longtemps été un matériau très apprécié dans la mise en œuvre des lignes aériennes. Seulement, la bonne résistance au fluage des câbles électriques est exigée.

Après une introduction générale, le manuscrit est composé de trois chapitres.

- Le premier chapitre est consacré aux notions de structure, déformation et mise en forme de métaux. Des notions de base ont été présentées afin de faciliter la compréhension du reste du mémoire.
- Le deuxième chapitre est réservé aux différents types d'essais mécaniques, c'est-à-dire, des essais comme la dureté, la traction et le fluage sont bien détaillés.
- Le troisième chapitre décrit la machine d'essai de fluage, ou des dessins techniques de chaque pièce et aussi de l'ensemble de l'appareil ont été expliqués.

CHAPITRE I

STRUCTURE, DEFORMATION ET MISE EN FORME

I.1 Introduction

Un matériau est la forme marchande d'une matière première choisie en raison de propriétés d'usage spécifiques et mise en œuvre par des techniques appropriées pour l'obtention d'un objet de géométrie donnée à fonction préméditée.

La maîtrise de nouveaux matériaux a été à l'origine de révolutions dans l'histoire des technologies. Les âges de la préhistoire sont d'ailleurs définis par les matériaux employés, âge de la pierre, âge du bronze, du fer. Aujourd'hui, le nombre de matériaux ou en tout cas le nombre de références est considérable et en constante augmentation. En effet, la science des matériaux permet de concevoir de nouveaux matériaux adaptés à chaque nouvelle application. On pourra distinguer deux grandes catégories de matériaux :

- (1) les matériaux de structure, et qu'on utilise essentiellement pour leurs capacités à soutenir des sollicitations mécaniques et thermiques.
- (2) les matériaux fonctionnels, qu'on utilise pour leurs propriétés physiques, telles que conductivité ou semi-conductivité électrique, magnétisme, propriétés optiques ...

Certains matériaux se trouvent à la frontière entre les applications mécaniques et physiques, comme par exemple les matériaux piézo-électriques qui délivrent un effort lorsqu'on les soumet à une différence de potentiel électrique.

Cependant, même en se restreignant aux matériaux de structure, le nombre de matériaux existant reste considérable.

I.2 Microstructures des matériaux

I.2.1 Liaison atomique

Les liaisons atomiques ont une influence directe sur les propriétés physiques des matériaux qu'elles unissent. On distingue 4 types de liaisons [1].

- Liaisons covalentes
- Liaisons ioniques
- Liaisons métalliques
- Liaisons de faible intensité

I.2.1.1 Liaison covalente

Cette liaison se caractérise par la mise en commun d'électrons afin de saturer les couches électroniques externes de chacun des atomes de la molécule. Cette liaison permet par exemple d'expliquer l'association de deux atomes d'hydrogène pour former la molécule de dihydrogène (Fig. I.1). La liaison covalente est également une liaison forte puisque elle permet de saturer la couche électronique externe des atomes [1].

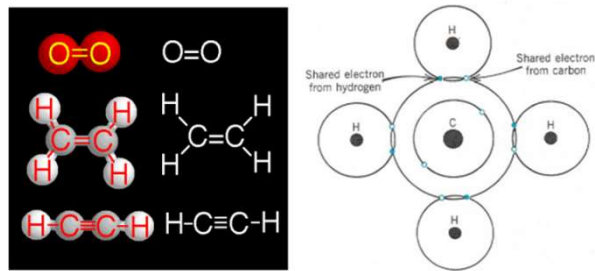


Figure I.1 : Représentation schématique d'une liaison covalente

dans une molécule de méthane (CH_4)

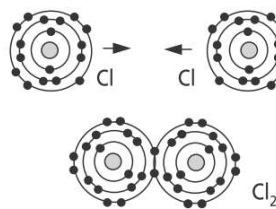


Figure I.2 : Exemple de liaisons covalente la molécule de dichlorée Cl_2 [1].

I.2.1.2 Liaison ionique

Cette liaison se caractérise par l'échange d'électrons entre deux atomes. Cette liaison est forte car elle sature la couche extérieure des atomes qui deviennent des ions. Cette liaison concerne essentiellement les éléments qui ont peu d'électrons sur leur couche externe (colonnes 1 et 2 du tableau périodique) et les éléments qui ont des couches externes presque saturées (colonnes 16 et 17 du tableau périodique). Par exemple, le sodium Na, présente une structure électronique comme suit : $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^1$. Il devient donc un ion Na^+ . Par ailleurs le Chlore Cl, présente une structure électronique comme suit $1s^2, 2s^2, 2p^6, 3s^2, 3p^5$, il devient donc un ion Cl^- , on obtient alors le composé stable Na Cl. Cette liaison est forte car elle stabilise fortement la structure électronique des atomes en saturant leur couche électronique externe (Fig. I.3) [1].

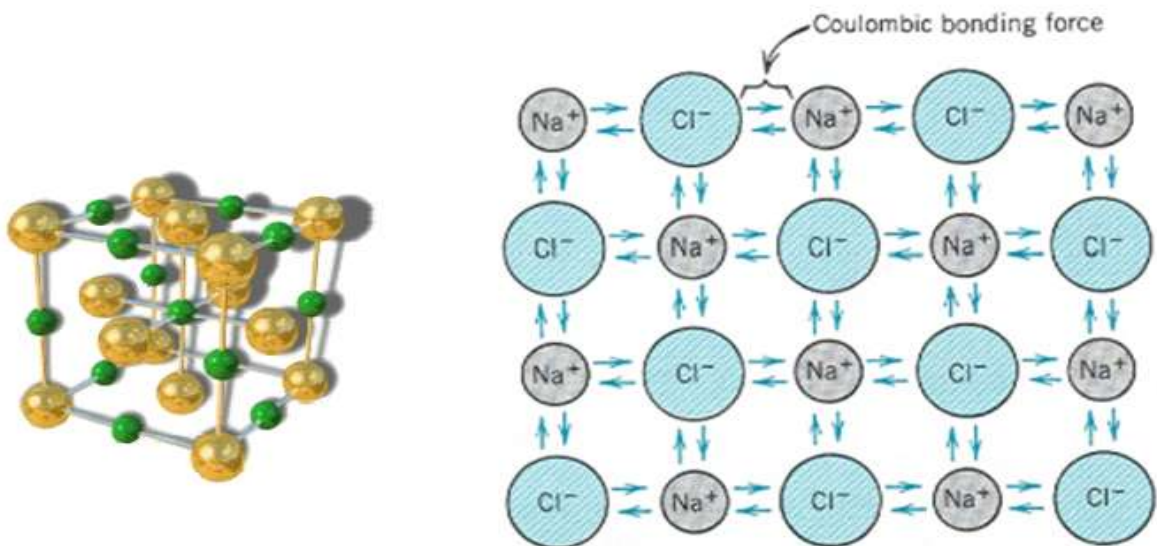


Figure I.3 : Représentation schématique de liaisons ioniques dans du chlorure de sodium (Na Cl)

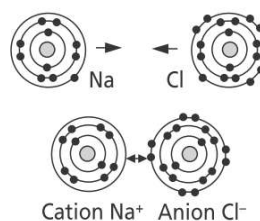


Figure I.4 : Exemple de liaisons ionique chlorure de sodium (Na Cl) [1].

I.2.1. 3 Liaison métallique

Cette liaison se caractérise aussi par la mise en commun d'électrons entre plusieurs atomes afin de saturer les couches électronique externes. A la différence de la liaison covalente, la liaison métallique est délocalisée, c'est-à-dire que chaque atome peut être considéré comme un ion baignant dans un gaz d'électron. Les orbitales externes des atomes « coalescent » lorsque le cristal se forme. Ainsi les électrons de la couche externe ont-ils la liberté de se déplacer partout dans le cristal. Le matériau est alors conducteur électrique et thermique. Les atomes qui, isolés, présentent en couche externe des orbitales de type s ou d, dont la forme est assez isotrope, ont davantage tendance, lorsqu'ils sont sous forme de cristaux, à former des liaisons métalliques. Cette liaison est un peu moins forte que les liaisons covalente ou ionique mais elle reste une liaison forte [1].

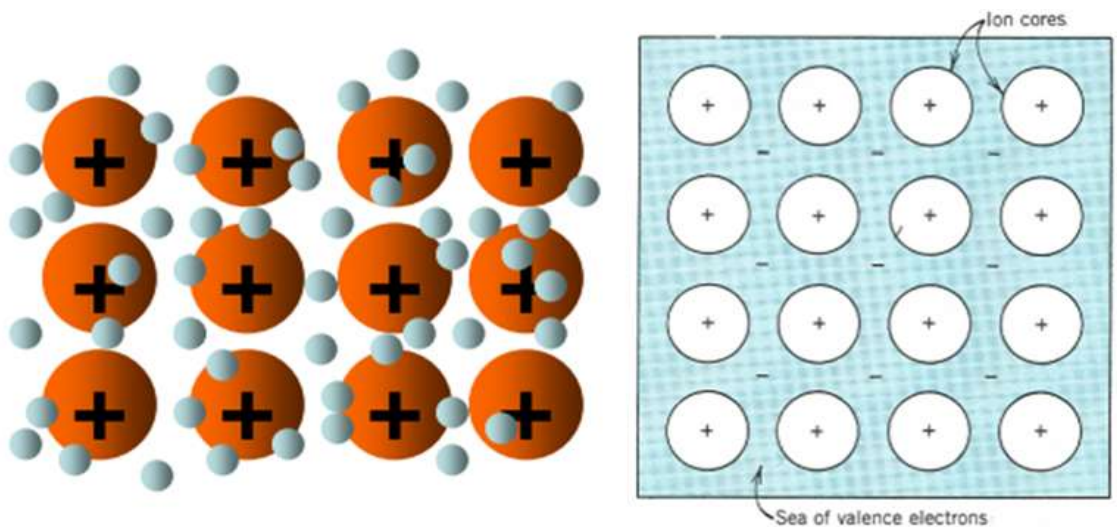


Figure I.5 : Représentation schématique de liaisons métalliques

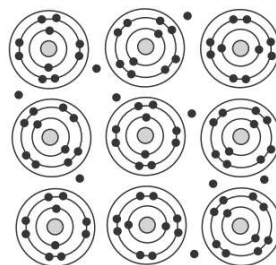


Figure I.6 : Exemple de liaisons métalliques cristal de sodium Na [1].

I.3 Structure cristalline des métaux

Un cristal se compose d'atomes (ions) répartis suivant une succession déterminée qui se reproduit périodiquement dans les trois dimensions. Pour décrire une structure cristalline, on recourt à la notion de réseau spatial ou cristallin c'est-à-dire un réseau spatial imaginaire ayant pour les nœuds les atomes (ions) constitutifs du métal (corps cristallin solide). Le volume minimal d'un cristal qui permet de juger de la structure atomique de volume tout entier s'appelle maille cristalline élémentaire [2].

Le réseau de la majorité des métaux usités dans l'industrie s'établit d'après un des systèmes suivants à symétrie élevée et à empilement compact des atomes (Fig. I.8, I.9, I.10) :

- La structure cristalline cubique centrée (manganèse, chrome,...) (Fig. I.8).

Une autre structure cristalline courante est dotée d'une maille élémentaire de forme cubique comprenant un atome situé à chacun des 8 coins et un seul atome au centre du cube (CC).

- La structure cristalline cubique à faces centrées (alu, cuivre, argent,...) (Fig. I.9).

De nombreux métaux présentent une structure cristalline à géométrie cubique, où les atomes de la maille élémentaire sont situés à chacun des coins et des centres de chacune des faces d'un cube. Cette structure est dite, à juste titre, cubique à faces centrées (CFC). Elle se retrouve dans des métaux bien connus comme le cuivre, l'aluminium, l'argent et l'or.

- La structure cristalline hexagonale compacte (magnésium, zinc,...) (Fig. I.10).

Certains métaux sont dotés d'une maille élémentaire de forme autre que cubique ; ainsi, la dernière structure cristalline métallique courante qui sera examinée ici possède une maille élémentaire de forme hexagonale (HC) [3].



Figure I.8 : La structure cristalline cubique centrée

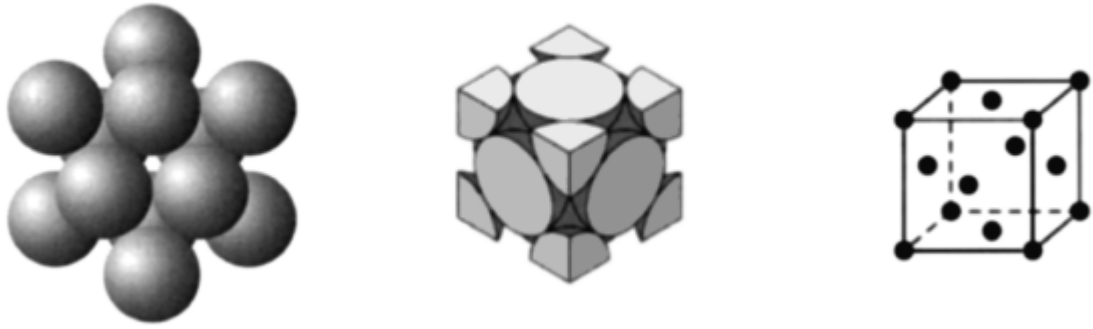


Figure I.9 : La structure cristalline cubique à faces centrées

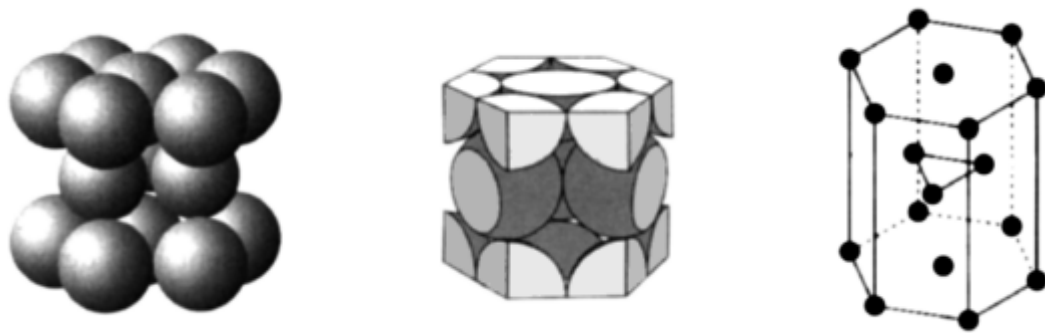


Figure I.10 : La structure cristalline hexagonale compacte

I.3.1 Les principaux types de défauts cristallins

Les défauts cristallins sont des défauts d'arrangement atomique d'un cristal. Tout cristal réel comporte toujours des défauts ou imperfections de structure, suivant les caractéristiques géométriques. Les défauts et leurs interactions jouent un rôle fondamental sur les propriétés physiques macroscopiques des matériaux cristallins en proportion de leur concentration.

On trouve principalement 3 types de défauts cristallins [4].

- Les défauts ponctuels: lacunes et interstitiels...
- Les défauts étendus:

Les défauts linéaires : dislocations coins, vis et mixtes...

Le défaut bi- ou tridimensionnel : joints de grains macles, parois d'antiphase et fautes d'empilement.

I.3.1.1 Les défauts ponctuels (de dimension nulle ou 0 dimension)

Les principaux défauts ponctuels sont :

- les lacunes ou défauts de SCHOTTKY.
- les atomes interstitiels ou défauts de FRENKEL.
- les atomes étrangers en substitution sur un site cristallographique.
- les défauts ponctuels combinés comme les centres colorés.

a- Les lacunes ou défauts de SCHOTTKY

Le défaut ponctuel le plus simple est la lacune : là où l'on s'attend à trouver un atome, sur l'un des sites cristallographiques de la structure, il n'y en a pas. La lacune s'appelle aussi défaut de SCHOTTKY et se représente, dans l'écriture chimique, soit par un carré vide, soit par la lettre V assortie en indice du symbole chimique de l'élément manquant (Fig. I.11). Par exemple, dans le chlorure de sodium Na Cl une lacune en sodium se note V_{Na} et une lacune en chlore V_{Cl} . L'équilibre électrique exigeant qu'il y ait autant d'ions positifs que d'ions négatifs, l'ion qui crée une lacune se trouve en fait rejeté à la surface du cristal.

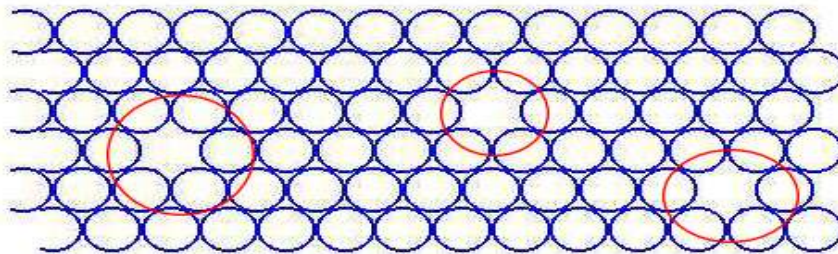


Figure I.11 : Défaut ponctuel simple la lacune ou défauts de SCHOTTKY

b- Les atomes interstitiels

Un atome interstitiel est un atome supplémentaire qui n'occupe pas une place prévue à cet effet dans la structure cristalline. Il faut communiquer une énergie considérable à un atome pour le déplacer de son site cristallographique et le mettre sur un site non prévu de la structure. Il y a alors formation d'un défaut de Frenkel, association d'une lacune et d'un atome interstitiel. Un atome étranger de taille convenable peut dans certaines conditions venir occuper un site cristallographique vacant de la structure "hôte". On a affaire dans ce cas à une solution solide interstitielle (Fig. I.12). Dans les deux cas le réseau cristallin se trouve déformé

par la présence de l'atome supplémentaire, sauf si sa taille est inférieure ou égale à celle du site qu'il occupe.

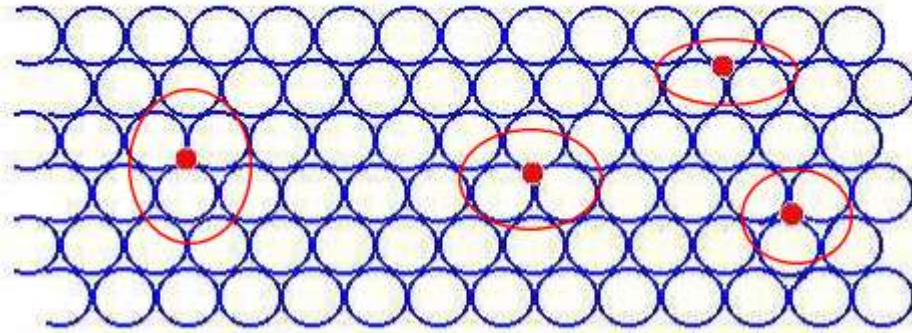


Figure I.12 : Défaut ponctuel simple atomes interstitiels ou défauts de FRENKEL

c-Les impuretés en substitution

Lorsqu'on remplace un atome dans une structure cristalline donnée par un autre atome, en général de taille et de :

Propriétés physico-chimiques voisines, on opère une substitution. Il existe de très nombreuses possibilités de solutions solides de substitution, chaque fois que l'élément substituant est très proche de l'élément substitué (Fig. I.13). Par exemple le cuivre et le nickel sont solubles à l'état solide en toutes proportions (les alliages sont les cupronickels utilisés dans la fabrication des pièces de monnaie). De la même manière l'or et l'argent, ou le silicium et le germanium, sont entièrement miscibles à l'état solide.

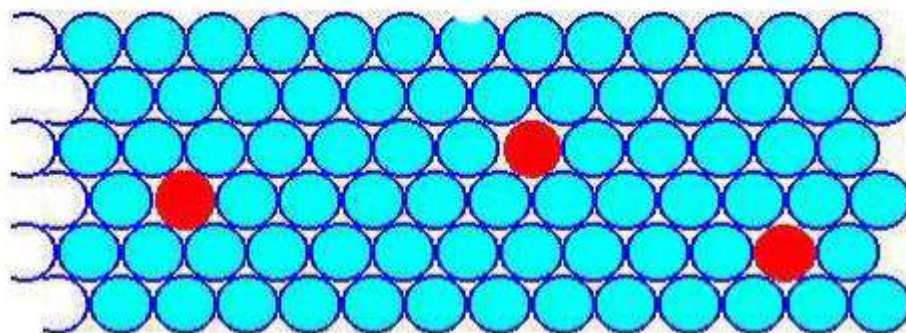


Figure I.13 : Défaut ponctuel simple la substitution, solutions solides désordonnée.

Le cuivre et l'or donnent des solutions solides de substitution, mais à la différence du système or-argent, certaines d'entre elles peuvent être ordonnées du point de vue cristallographique, pour certaines compositions (Fig. I.14). On les appelle sur structures. Par exemple les alliages Au Cu, Cu₃Au, Au₃Cu, obtenus solides par refroidissement lent de la phase liquide, s'ordonnent dans des sur structures où alternent les plans d'atomes de cuivre et d'atomes d'or .

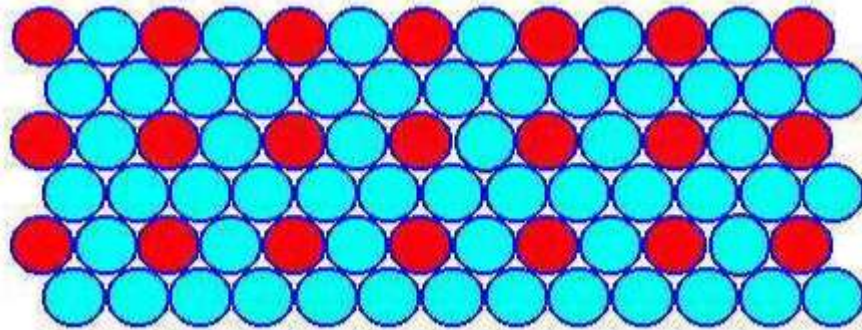


Figure I.14 : Défaut ponctuel simple la substitution, solutions solides ordonnée.

d-Les défauts associés

➤ Les défauts de Frenkel

Le défaut associé le plus simple est celui qui combine une lacune et un atome interstitiel, lorsqu'un atome quitte son site cristallographique pour occuper un site voisin, en principe vacant, cela sous l'action d'un fort apport d'énergie, une irradiation par exemple. C'est un défaut de Frenkel.

➤ Les doubles lacunes

Il est possible de trouver, dans les structures macromoléculaires covalentes ou dans les structures ioniques par exemple, l'association de deux lacunes : dans Zn S, une lacune de zinc et une lacune de soufre voisines, les deux atomes étant manquants; dans Na Cl, une lacune de sodium et une lacune de chlore voisines. Il s'agit dans les deux cas d'une double lacune. Si la perturbation géométrique demeure et se trouve même amplifiée par rapport à une lacune simple, la perturbation électrique est réduite.

➤ Les centres colorés

Un centre coloré est un défaut cristallin qui absorbe la lumière dans le domaine du visible. Une lacune simple ne colore pas un cristal, mais certaines associations de défauts le font.

I.3.1.2 Les défauts étendus

I.3.1.2.1 Les défauts linéaires

On distingue principalement deux catégories de défauts étendus : les défauts linéaires et le défaut bi- ou tridimensionnel.

Les dislocations sont des défauts linéaires pouvant se propager dans toute l'étendue du cristal.

Les glissements sont des défauts plans séparant deux parties d'un cristal qui se sont déplacées parallèlement l'une par rapport à l'autre.

Les macles sont des défauts plans séparant les deux parties d'un cristal images l'une de l'autre (symétriques) par rapport au plan de macle.

Les défauts d'empilement qui, comme leur nom l'indique, marquent une discontinuité, aléatoire ou ordonnée, dans l'empilement des espèces chimiques.

Les rassemblements sont des défauts tridimensionnels dans lesquels une seule sorte d'atomes ségrége et se rassemble dans une zone du cristal, dans certains types d'alliages par exemple.

➤ Les dislocations

Les dislocations sont des défauts linéaires particulièrement importants qui interviennent dans les mécanismes de déformation des métaux et des matériaux d'une manière plus générale. Une dislocation est une ligne d'imperfection qui délimite dans le cristal une région qui a glissé relativement à une autre non déformée, la densité de ces défauts est importante en général.

La dislocation est une distorsion du réseau cristallin très localisée selon deux directions et très étendue dans la troisième direction. On peut l'assimiler à une ligne. On observe ainsi très bien en microscopie à transmission les zones distordues d'un réseau cristallin, qui apparaissent comme des lignes noires (Fig. I.15). Il n'est pas rare d'observer des lignes de dislocation qui traversent tout le grain.

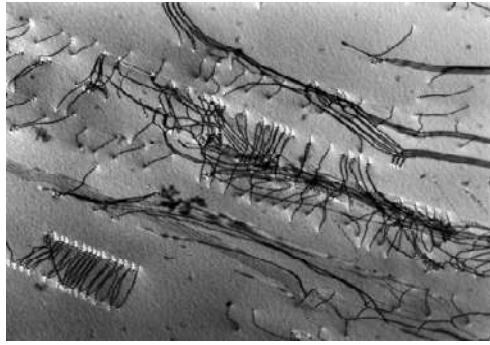


Figure I.15: Observation en microscopie à transmission de lignes de dislocation dans un acier inoxydable 316 L

➤ Dislocations vis et coin, vecteur de Burgers

La dislocation est donc un défaut linéique. Il en existe schématiquement deux types, les dislocations vis (Fig. I.16c) et les dislocations coin (Fig. I.16b). La figure I.16b représente une dislocation coin, la ligne de dislocation est perpendiculaire au plan de coupe. On peut définir le vecteur de burgers de la dislocation en imaginant un circuit fermé suivant la matière dans le cristal parfait puis le même circuit dans le cristal contenant un défaut. Le circuit est ouvert lorsque le cristal contient un défaut. Le vecteur liant les deux extrémités du circuit est appelée le vecteur de Burgers, et noté \mathbf{b} . Ce vecteur est orthogonal à la ligne de dislocation dans le cas d'une dislocation coin et parallèle dans le cas d'une dislocation vis.

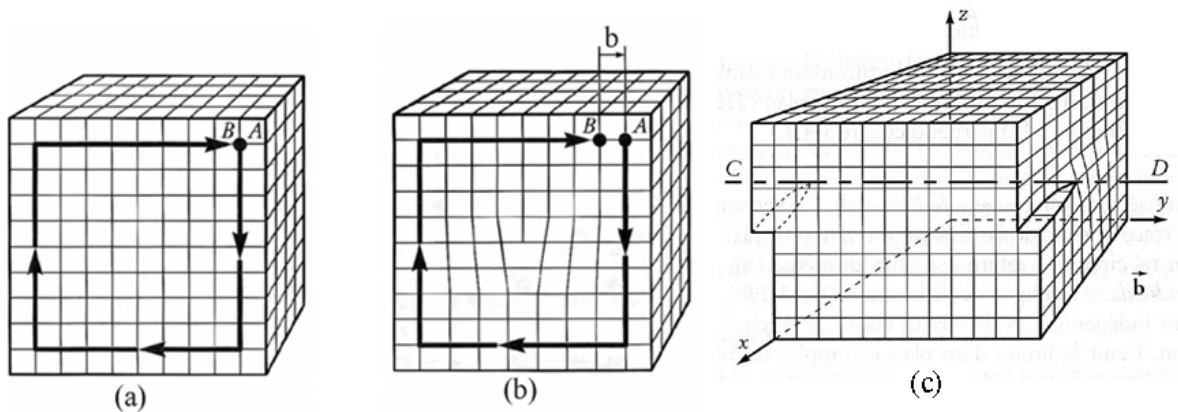


Figure I.16 : (a) Cristal parfait, (b) Dislocations coin, (c).Dislocations vis.

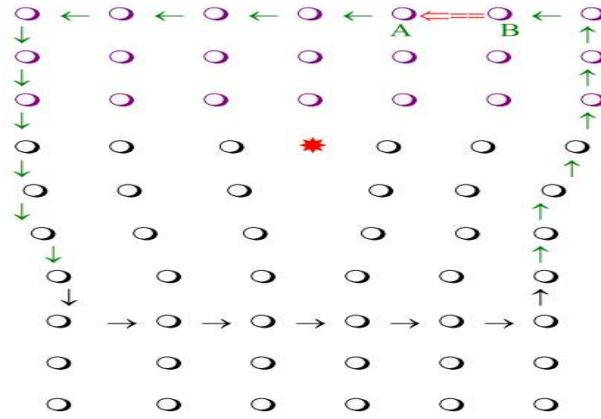


Figure I.17 : vecteur de BURGERS d'une dislocation

I.3.1.2.2 Les défauts surfaciques

➤ Joint de grains, joint de phases

Sauf élaboration particulière, la quasi-totalité des solides cristallins est constituée d'un agglomérat de cristaux, ou grains accolés avec des orientations différentes. La taille des grains varie de quelques microns à quelques millimètres suivant les conditions d'élaboration. Si ces cristaux sont de nature identique, leur surface d'accolement est appelée joint de grains. Si les cristaux sont de nature différente, leur surface d'accolement est appelée joint de phases (Fig. I.18) [5].

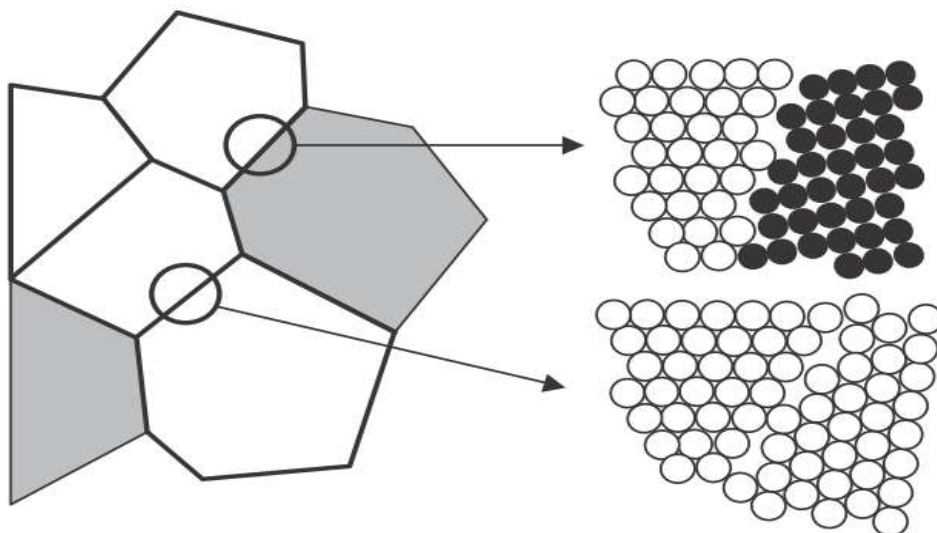


Figure I.18 : Poly cristal, et schématisation à deux dimensions d'un joint de grains et d'un joint de phases [5].

➤ Joint de macle

Il peut exister des plans cristallographiques particuliers autorisant le cristal à se disposer indifféremment dans le prolongement de son orientation initiale (cristal-mère) ou en position symétrique par rapport à ce plan particulier (cristal maclé) ceci suppose que les niveaux d'énergie des atomes en position initiale et en position symétrique soient identiques. Les joints de macle sont aisément reconnaissables à leur tracé rectiligne (Fig. I.19) [5].

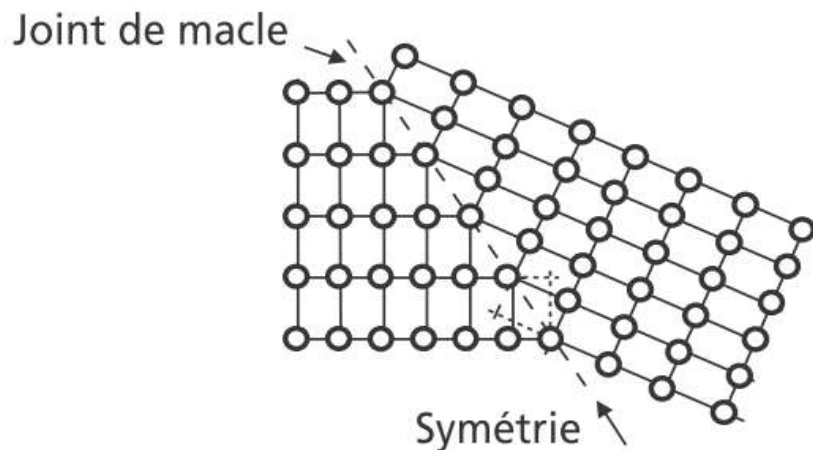


Figure I.19 : Schématisation à deux dimensions d'un joint de macle.

Le cristal maclé et le cristal mère sont identiques à une symétrie près [5].

➤ Les glissements

Les métaux sont caractérisés par leur ductilité, on dit aussi plasticité. Cela signifie qu'ils se déforment sous l'action d'une contrainte sans changer de structure, c'est à dire en conservant la même structure atomique. Cela est possible parce que les rangées atomiques peuvent glisser les unes par rapport aux autres, le glissement ne nécessitant pas une énergie considérable, mais à condition qu'il soit facilité par la présence d'une dislocation. En effet, sans dislocation l'énergie de glissement serait environ 100 fois plus grande. Le glissement est équivalent au déplacement de la dislocation le long du plan de glissement [5].

I.4 Déformation

On donne le nom déformation à la modification des dimensions et de la forme d'une substance sous l'action des forces appliquées. La déformation est provoquée par l'application des forces extérieures ou par des processus physiques et mécaniques variés, dont le corps est le siège (par exemple, modification du volume des cristaux isolés sous l'effet de transformation de phase ou du gradient thermique).

I.4.1 Déformation élastique

Est une déformation dont l'action sur la forme, la structure et les propriétés d'un corps cesse complètement lorsque la charge appliquée est supprimée, cette déformation ne provoque pas de modifications permanentes perceptibles de structures et de propriétés du métal ; la charge appliquée ne produit qu'un déplacement relatif et parfaitement réversibles des atomes ou le pivotement des blocs de cristal [2].

I.4.2 La déformation plastique

L'étude des propriétés mécaniques des métaux et en particulier leurs propriétés plastiques a un intérêt pratique considérable. Une grande partie de la recherche en métallurgie a pour but la mise au point d'alliages à résistance mécanique et à ténacité de plus en plus élevée. L'effort de traction à vitesse constante d'allongement permet l'étude détaillée des propriétés mécaniques de base, mais cette étude peut être complétée par des observations micrographiques, qui peuvent mettre en évidence les modes de déformation plastique, l'étape de perfection de la structure cristalline (présence de défauts cristallins) [2].

Dans ce contexte, la théorie des dislocations joue un rôle important, car elle nous permet de prévoir quelques données essentielles de la déformation plastique. Considérons un monocristal soumis à un effort de traction. Diverses familles de plans de glissements sont possibles pour les dislocations, les plans (111) par exemple dans la structure CFC (Fig. I.20) [2].

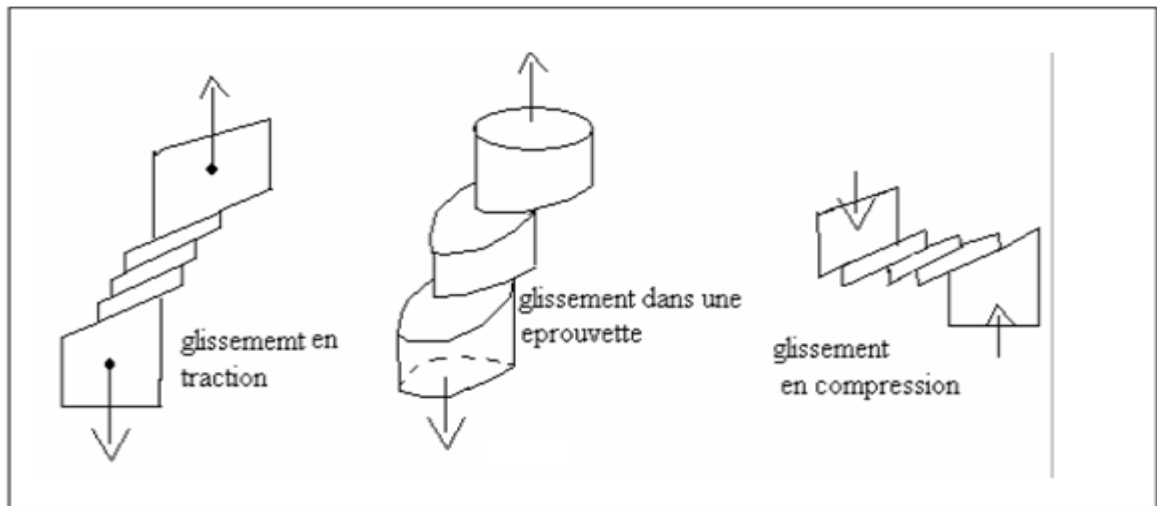


Figure I.20 : Glissement dans les éprouvettes [2].

I.4.3 Types de déformations

I.4.3.1 Déformation à froid

On appelle déformation à froid celle qui s'effectue aux températures inférieures à la température de recristallisation [2].

La déformation plastique à froid conduit à l'écroutissage du matériau, donc à son durcissement. Cet écroutissage dépend de la composition chimique du matériau, du taux de déformation appliqué et des conditions de déformation (température, vitesse et mode de déformation). En effet, la déformation à froid entraîne une importante augmentation de la densité de dislocations (i.e. énergie élastique stockée) dans le matériau. Il s'ensuit une hétérogénéité de la microstructure et de la texture cristallographique à l'intérieur des grains. Pour conférer au matériau les propriétés mécaniques souhaitées, celui-ci est recuit après déformation. Ce recuit conduit à une réorganisation de la microstructure par diminution ou suppression des obstacles les plus importants aux mouvements des dislocations. Lors du traitement thermique après déformation, deux phénomènes plus ou moins concurrents ont lieu : la restauration et la recristallisation. Ces deux types d'évolution structurale ont la même force motrice c'est-à-dire l'énergie élastique emmagasinée au cours de la déformation à froid [6].

Lors d'une déformation à froid, la microstructure évolue en fonction du taux de déformation. Au cours du premier stade de déformation, les grains se subdivisent, changent de forme et s'allongent selon la direction de sollicitation. Une sous-structure de dislocations apparaît à l'intérieur des grains, dépendant de leur orientation cristallographique [7, 8].

La subdivision des grains donne lieu à une configuration cellulaire (blocs de cellules) constituée de "parois" à forte densité de dislocations entourant des volumes à faible densité de dislocations.

Quand le taux de déformation augmente, les parois des cellules s'affinent pour former des sous-joints (Fig. I.21). Cette transformation est accompagnée par une diminution de la taille des cellules [8, 9].

Ainsi que par une augmentation progressive de leur désorientation (1° à environ 5°). Les joints de blocs des cellules sont identifiés comme étant des murs denses de dislocations (Dense Dislocations Walls DDW) [7, 10].

Pour les fortes déformations, d'autres formes d'hétérogénéités apparaissent :

- Des microbandes constituées par des cellules de dislocations de taille plus faible que la valeur moyenne des cellules de dislocations au sein du même matériau.
- Des bandes de cisaillement, typiquement à 30 ou 40° de la direction de sollicitation, sous forme de longues bandes d'épaisseur $0,1$ à $2 \mu\text{m}$ et de longueur 10 à $100 \mu\text{m}$ [10, 11].
- La localisation de la déformation dans ces bandes est d'autant plus importante que la température et l'énergie de défauts d'empilement sont faibles.
- Des bandes de transition séparent des zones adjacentes fortement désorientées d'un même grain. Elles sont souvent parallèles à la direction de déformation principale et accommodent des désorientations supérieures à 20° sur des épaisseurs de 1 à $2 \mu\text{m}$. La déformation plastique crée également une quantité importante de défauts ponctuels (lacunes et interstitiels), mais qui s'éliminent en grande partie soit pendant la déformation (restauration dynamique si $T \geq 0,2 T_f$), soit lors d'un recuit ultérieur même à basse température [4].

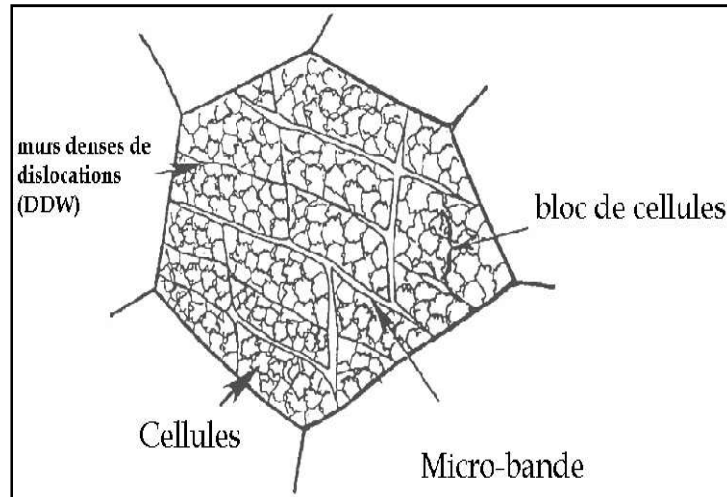


Figure I.21 : Blocs de cellules et murs denses de dislocations [10].

I.4.3.2 Déformation à chaud

La déformation est dite à chaud si elle se fait à une température supérieure à celle de recristallisation, pour obtenir une structure complètement recristallisée. A ces températures, la déformation produit également un effet durcissant (écrouissage à chaud), éliminée partiellement ou complètement par polygonisation et recristallisation réalisées aux températures de traitement et suivis de refroidissement. A la différence d'une polygonisation et d'une recristallisation statique examinées dans ce qui précède, les processus de polygonisation et recristallisation associées à la déformation sont dits dynamiques. Dans le traitement à chaud (laminage, formage, forgeage, estampage, etc.), le durcissement par écrouissage (augmentation de la densité de dislocation) directement au cours de la déformation alterne avec le processus d'adoucissement (diminution de la densité de dislocation) par polygonisation et recristallisation dynamiques pendant la déformation et le refroidissement. Lorsque les degrés de déformation sont très faibles, le chauffage ne provoque pas de recristallisation. A la déformation de 3% à 15%, la grosseur de grain après recuit augmente brusquement et peut dépasser de nombreuse fois la dimension du grain initial. Ce niveau de déformation est dit critique ; il ne déclenche pas non plus le processus de recristallisation suivant le mécanisme de formation de nouveaux grains et de leur croissance. Lorsque le degré de déformation est élevée, la vitesse de germination produite par la recristallisation croît plus vite que la vitesse de croissance des grains ; il en résulte la formation des grains fins. Il convient de souligner que les limites entre la déformation à chaud et à froid sont conventionnelle et dépendent de la vitesse, du mode et de la température de traitement, des conditions de refroidissement, ainsi que de la vitesse de recristallisation du métal (alliage) [2].

I.4.3.2.1 Evolution microstructurale lors de la déformation à chaud

On distingue deux classes de sollicitations des solides en fonction de la température, celles à basses températures et celles à hautes températures. En effet, au-delà d'environ $0,5 T_f$ (T_f désignant la température de fusion en Kelvin), l'agitation thermique est telle que des mécanismes de réorganisations atomiques spécifiques apparaissent. La diffusion peut en effet changer les conditions de mobilité des atomes, ou des dislocations et donc les modes de déformation. Le taux de déformation imposé et la vitesse à laquelle on sollicite le matériau jouent également un rôle notable dans l'activation de ces mécanismes.

Si l'on s'intéresse à la mise en forme à chaud (opérations industrielles telles que le forgeage, le matriçage, l'estampage ou le laminage à chaud), on est amené à considérer des quantités de déformation souvent très importantes réalisées sur des périodes de temps relativement courtes, c'est à dire à des vitesses de déformation typiquement comprises entre 0.1 et 100 s^{-1} . Au cours de ces opérations, les matériaux vont être le siège d'évolutions microstructurales importantes qui vont permettre d'agir sur l'organisation atomique et l'architecture, et donc conditionner leurs caractéristiques mécaniques finales. Ces évolutions microstructurales pendant la déformation à chaud sont essentiellement des combinaisons de l'écroutissage avec la restauration dynamique et avec la recristallisation dynamique.

I.4.3.2.2 Restauration dynamique

La déformation induit une création de dislocations, qui, comme nous l'avons vu précédemment peuvent se déplacer et amener le développement de sous-structures. Lorsque les dislocations sont effectivement très mobiles, on voit se former, à l'intérieur des grains initiaux, des sous-grains, c'est à dire des cellules contenant peu de dislocations et désorientées les unes par rapport aux autres de quelques degrés (Fig. I.22). Pendant la suite de la déformation, les sous-grains se détruisent et se reforment continuellement lors d'une étape appelée repolygonisation, avant d'atteindre un état quasi stationnaire qui repose sur un équilibre entre la création de dislocations, et l'arrangement et l'annihilation de dislocations. L'ensemble de ces phénomènes constitue les caractéristiques de la restauration dynamique.

Quand les sous-grains adjacents présentent des désorientations importantes (supérieures à 15°), on peut alors parler de développement de grains nouveaux et de processus de recristallisation dynamique continue.

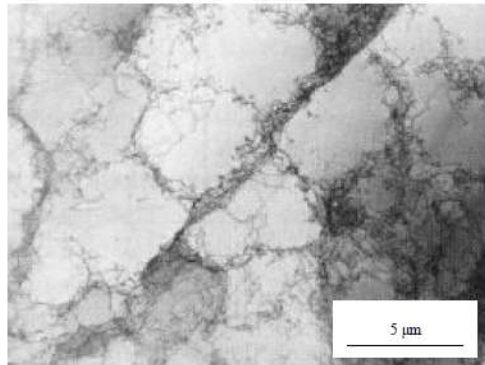


Figure I.22 : Structure de cellules de dislocations dans un alliage d'aluminium [12].

I.4.43.2.3 Recristallisation dynamique discontinue

Dans d'autres matériaux, les dislocations sont au contraire peu mobiles et restent très dispersées, si bien que le phénomène de restauration dynamique est peu efficace. A partir d'un certain taux de déformation, on voit alors apparaître des germes de nouveaux grains, avec leur propre orientation cristallographique, qui se développent dans la matrice écrouie en annihilant les dislocations. C'est donc un phénomène typique de germination croissance schématisé à la figure I.23 Mais, comme la déformation se poursuit, les grains recristallisés s'écrouissent à leur tour ; dans différentes zones du matériau, se mettent alors en place des cycles d'écrouissage et de recristallisation successifs qui ne sont pas a priori synchronisés. A partir de ce stade, le matériau est donc constitué de volumes de matière présentant différents taux d'écrouissage.

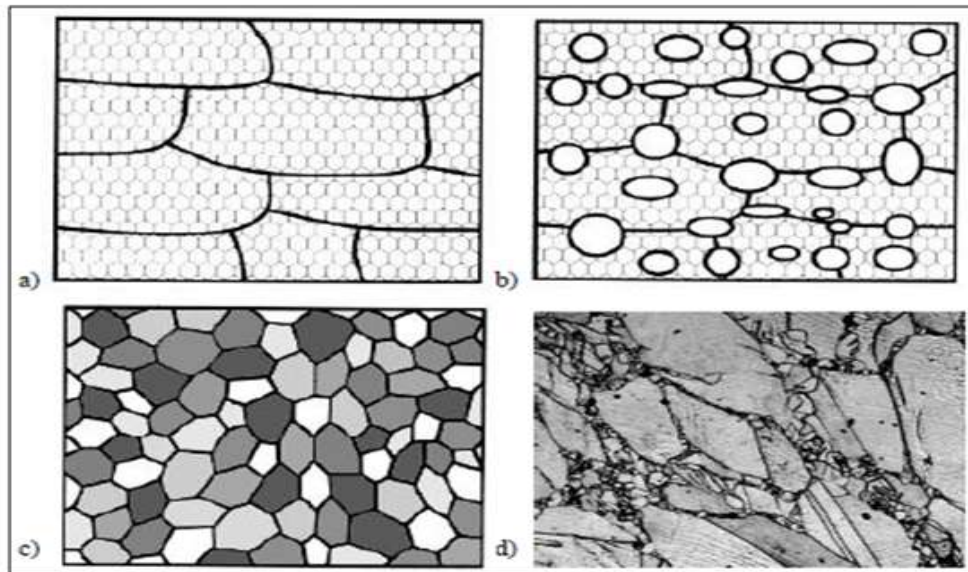


Figure I.23 : Recrystallisation dynamique : a) structure déformée restaurée et non recristallisée; b) germination de nouveaux grains; c) grains à des niveaux différents d'écrouissage; d) exemple d'une microstructure d'un acier austénitique présentant des grains écrouis et recristallisés [13].

I.5 Procédés de mise en forme de cuivre

Les métaux et les alliages sont commercialisés sous différentes formes, en fonction de leur utilisation ultérieure, dans l'industrie actuellement les principaux procédés de mise en forme des métaux sont apparus progressivement donnant naissance par la suite à diverses variantes, grâce à la déformation plastique qui est une propriété spéciale aux métaux qui leur donne la possibilité de se déformer sans rupture, produire des pièces de forme très complexes et facilite la mise en forme.

Il existe deux types de transformation et plusieurs procédés de mise en forme :

➤ Première transformation et fonderie

Première transformation :

- fabrication des fils : tréfilage
- fabrication des barres, profilés et barres creuses : filage et étirage,
- Fabrication des méplats, planches et bandes : laminage.
- Fabrication des tubes : filage et laminage, étirage [14].

Fonderie :

- Fusion
- Coulée semi-continue
- Coulée continue

➤ **Deuxième transformation**

- Transformation à chaud : Forage, matriçage
- Transformation à froid : Découpage, Pliage et cintrage, Emboutissage frappe à froid, Usinage [14].

I.5 .1 Laminage**I.5 .1.1 Définition**

Le laminage consiste à mettre en forme des alliages par étirage longitudinal et diminution d'épaisseur lors du passage de la matière entre deux cylindres parallèles et tournant en sens inverse. Lorsque le laminoir ne comporte que deux cylindres, il forme un duo (Fig. I.29. a), mais dans ce cas après une passe, il faut ramener la pièce au point de départ, pour procéder à une nouvelle passe, d'où perte de temps et de chaleur. C'est pourquoi on utilise de préférence un trio (3 cylindres en parallèles), (Fig. I.29 b) dans ce laminoir, le retour de pièces permet une opération de laminage. On peut également éviter le passage à vide en inversant le sens de rotation après chaque passe (laminoir réversible) [15].

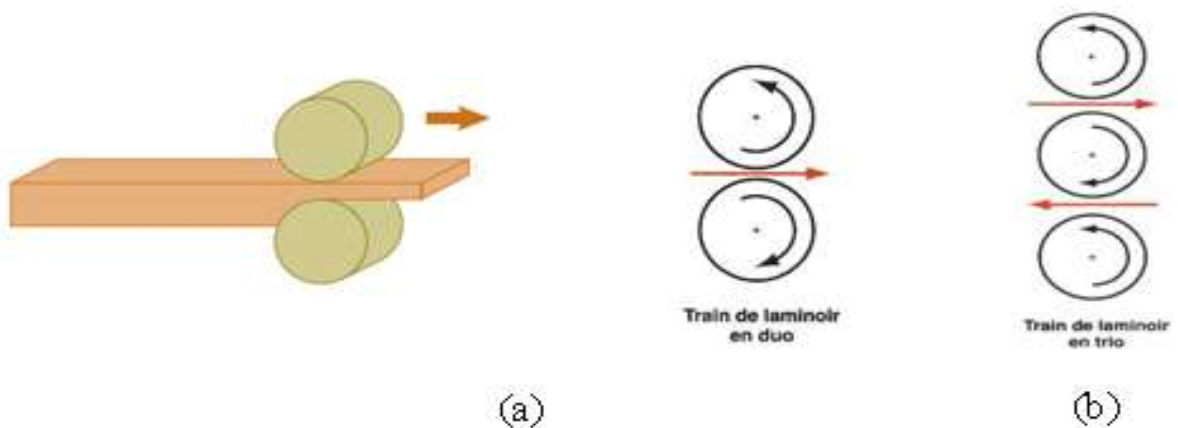


Figure I.24 : Schéma des trains de laminoirs [8].

I.5 .1.2 Principe

Le laminage consiste à réduire l'épaisseur e_1 d'une tôle à une valeur e_2 sous l'action d'un effort d'écrasement w et d'un couple d'entraînement C (Fig. 1.25). Le taux de réduction $(1 - e_2/e_1)$ est une donnée essentiel du procédé, puisque un taux important signifie une gamme de mise en forme plus courte et moins couteuse.

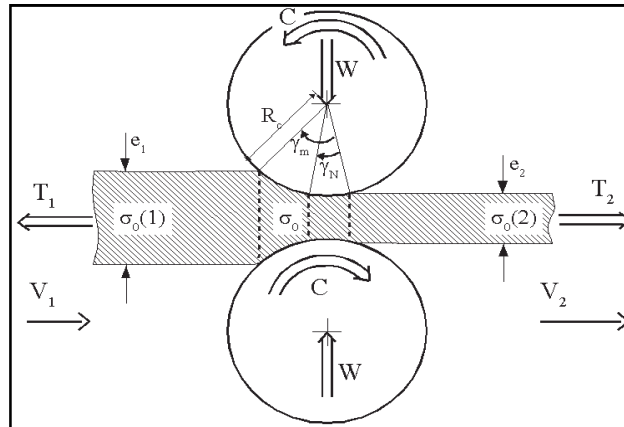


Figure I.25 : Schéma de principe de laminage [16].

I.5 .2 Tréfilage

I.5 .2 .1 Définition

Le tréfilage est un procédé de mise en forme largement utilisé pour la fabrication de fils métalliques. Cette partie a pour but de présenter les techniques propres au tréfilage des fils ultrafins en cuivre et en alliages cuivreux recouverts d'un revêtement métallique ou non, dont le diamètre est de l'ordre du centième de millimètre [17].

I.5 .2 .2 Tréfileuses

La figure I.26 représente un modèle type d'une tréfileuse qui se compose de :

- Le dévidoir : qui permet le déroulement continu de couronne de fil.
- La boîte à savon : qui permet de logement du porte filière et le logement du lubrifiant.

- porte de filière : qui permet le positionnement de la filière et le refroidissement de celles-ci.
- La bobine : qui permet de tirer le fil à travers la filière et l'enrouler en spire.
- L'extracteur : permettant d'enlever la couronne de fil de la bobine.
- La boîte de vitesse : qui permet de varier la vitesse de rotation de la bobine.
- La filière (passe) : est un bloc en générale cylindrique percé en orifice calibré ayant les dimensions et la forme du produit que l'on désire à tréfilé.

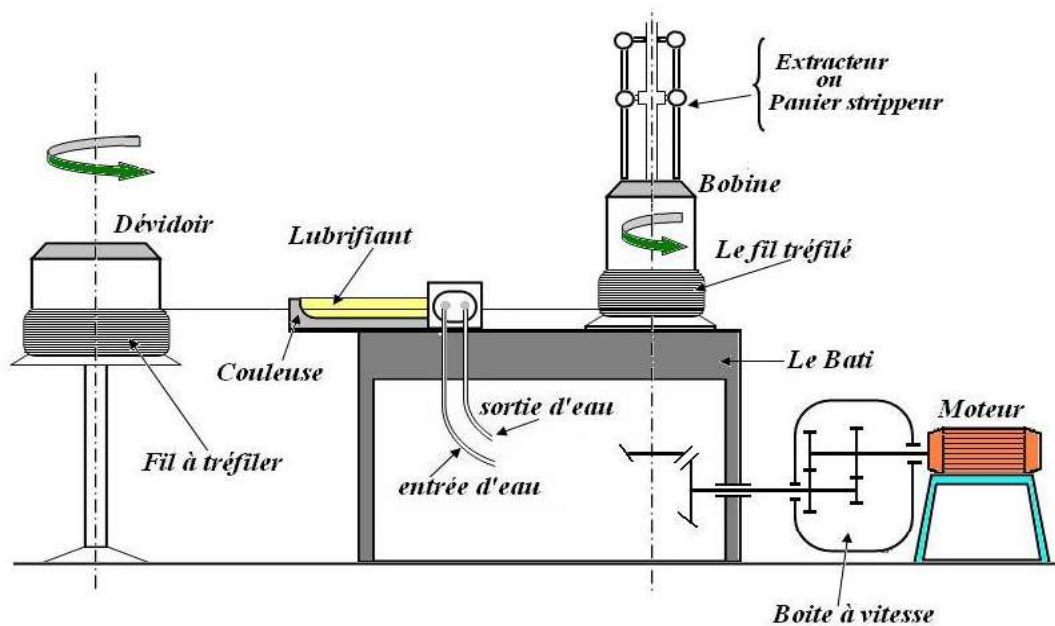


Figure I.26 : Schéma d'un banc à tréfiler

L'allongement du fil λ

La conservation du volume (Fig. I.27), entre l'entrée et la sortie de filière, au cours de la déformation plastique permet d'écrire que $S_e \cdot L_e = S_s \cdot L_s$. Nous avons alors

$$\lambda = \frac{L_s}{L_e} = \left(\frac{R_e}{R_s}\right)^2 \quad (I.1)$$

Avec L_e , L_s : les longueurs initiales et finales de fil.

Avec R_e , R_s : les rayon initiales et finales de fil [18].

La réduction du fil

$$r = 1 - \left(\frac{R_s}{R_e}\right)^2 \quad (\text{I.2})$$

la déformation

$$\varepsilon = \ln \lambda = 2 \ln \left(\frac{R_e}{R_s}\right) \quad (\text{I.3})$$

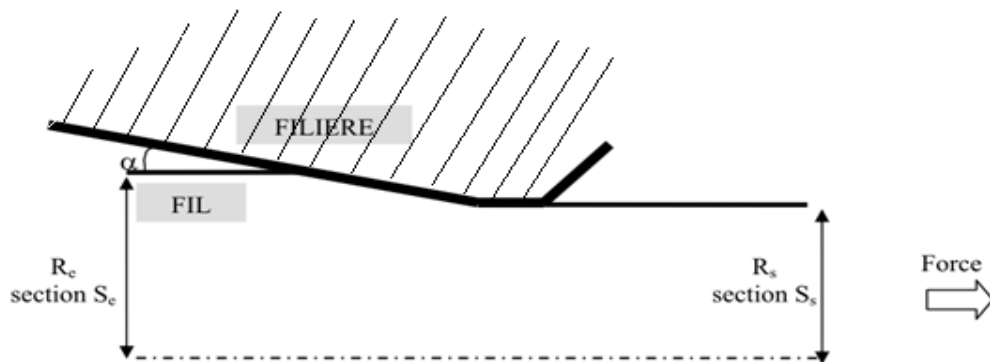
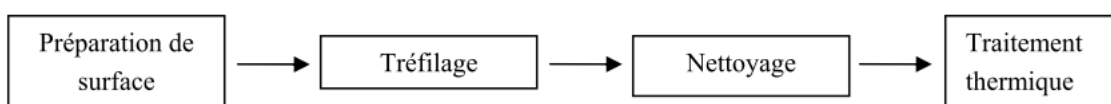


Figure I.27 : Schéma d'une passe de tréfilage et notations utilisées [18].

I.5.2.3 Principe

Le principe du tréfilage est de faire passer le fil machine préalablement décapé, traité et lubrifié à travers une série d'orifices calibrés appelés filières (Fig. I.28). La filière est l'élément essentiel du tréfilage. Elle est constituée d'un élément dur en carbure de tungstène contenu dans un support d'acier. La partie active de la filière est constituée du cône de travail ou cône de tréfilage.

Une opération industrielle de tréfilage se compose de quatre étapes élémentaires :



Diminuer la taille des caractères

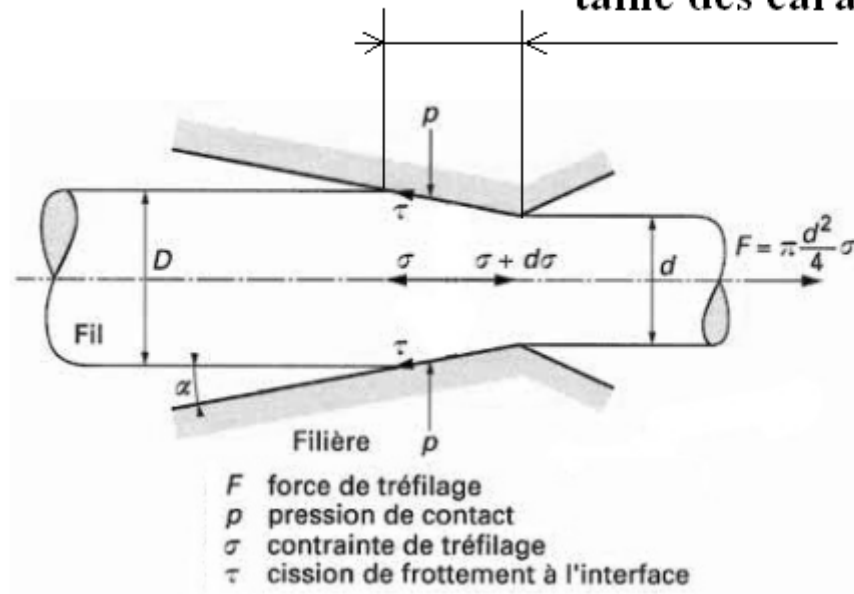


Figure I.28 : Schéma de principe de tréfilage [18].

I.5 .2 .4 Utilisation des savons

La pratique la plus répandue et la plus simple est d'utiliser les savons sous forme pulvérulente en remplissant les savonniers placés en amont de la filière (Fig. I.29)



Figure I.29 : savonnier [18].

Toutefois, l'entraînement du savon par le fil n'est jamais garanti : il dépend de facteurs tels que l'état de surface du fil et son diamètre, la coupe granulométrique de la poudre de savon, de la vitesse, etc. Des solutions ont donc été proposées pour augmenter la prise de savon et améliorer ainsi la lubrification :

Application sur le fil de savon sous forme de film solide avant tréfilage (Fig. II.30). Le principe de ce procédé est de convertir le lubrifiant pulvérulent en une dispersion aqueuse dans laquelle le fil va être immergé. Il est cependant nécessaire que le savon présente une stabilité physique et chimique et qu'il se dissolve partiellement. Après séchage, le fil est recouvert uniformément d'une couche de lubrifiant dense, très adhérente et de forte viscosité dont la qualité et l'épaisseur dépendent de paramètres tels que la composition et la température du bain de revêtement, et des paramètres de séchage [18].

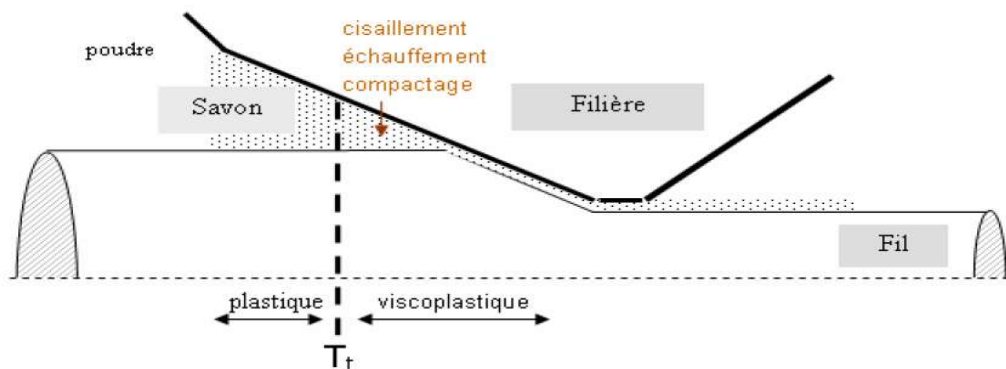


Figure I.30 : Evolution de la rhéologie du savon lors d'une opération de tréfilage élémentaire [18].

I.5.2.5 Machine de tréfilage

Pour amener le fil au calibre souhaité, il est nécessaire de faire plusieurs passes (de l'ordre de 5 à 7), à l'aide de bancs de tréfilage multipasse (Fig. I.31) qui sont essentiellement de trois types :

Banc multiple continu : dans ce type de banc, la vitesse des tambours est réglée afin que chaque tambour débite exactement la quantité de fil nécessaire.

Banc multiple à accumulation : dans ce type de banc, la vitesse des tambours n'est pas équilibrée, ce qui entraîne une accumulation du fils sans glissement d'un tambour par rapport à l'autre.

Banc multiple à glissement : dans ce cas, la vitesse des tambours n'est pas équilibrée et il n'y a pas accumulation. Pour que ces bancs puissent fonctionner, il y a un glissement du fil sur le tambour.

Pour ce faire, les tambours, le fil et les filières sont immergés dans un lubrifiant liquide. En général, ce type de banc est alimenté par du fil fin ébauché.

Le tréfilage proprement dit a pour but de réduire la section du fil, d'obtenir de bonnes tolérances dimensionnelles et d'augmenter les caractéristiques mécaniques par écrouissage [19].



Figure I.31 : Bancs de tréfilage multi passe de l'EN.I.CA.B

CHAPITRE II

LES ESSAIS MECANIQUES

II.1 Généralités

Les essais mécaniques sont des expériences dont le but est de caractériser les lois de comportements des matériaux (mécanique des milieux continus). La loi de comportement établit une relation entre les contraintes (pression=force/surface) et les déformations (allongement unitaire sans dimensions). Il est à noter qu'il ne faut pas confondre une déformation avec un déplacement ou une dilatation.

Cependant, la déformation d'une pièce dépend de la forme de la pièce et de la manière dont sont exercés les efforts extérieurs sur cette pièce. Il faut donc normaliser les essais. Des normes définissent donc : la forme de la pièce dont est fait le matériau on parle d'éprouvette, Comment sont exercés les efforts sur l'éprouvette on parle d'essai normalisé.

II.2 Essai de dureté

Si la notion de dureté est l'une des plus intuitives, sa mesure correspond en pratique à celle de la résistance à la pénétration locale du matériau considéré. Les essais de la dureté permettent de définir quelques caractéristiques des matériaux tels que ; (les modules d'Young et de Coulomb, coefficient de poisson, dureté, viscosité, forces d'adhésion (entre la pointe et le substrat) ou encore ténacité et énergie de rupture, etc.), mais aussi de la nature et de la forme du pénétrateur et du mode de pénétration [20, 21].

II.2.1 Définition de dureté

La définition valable pour la dureté est la résistance qu'oppose un corps à la pénétration d'un corps plus dur. La dureté est un complément indispensable de l'examen métallographique, qui donne une première impression sur les caractéristiques mécaniques et corrobore souvent l'interprétation des textures. Selon le type de charge du corps d'essai lors de la pénétration dans le matériau, on distingue deux procédés: [22].

- procédé avec action statique (par pénétration).
- procédé par action dynamique (par rebondissement) [22].

II.2.2 Principe de l'essai de pénétration

Il consiste à enfoncer un pénétrateur dans le métal à essayer. La charge est constante et on mesure la dimension de l'empreinte. L'empreinte est d'autant plus grande que le métal est moins dur. La dureté H s'exprime par le rapport de la force sur la surface de l'empreinte :

$$H = \frac{F}{S}$$

Les essais les plus classiques sont les essais Brinell, Vickers et Rockwell (Tableau. II.1) [23].






Pénétrateur	Brinell	Rockwell		Vickers	Knoop
Nature	Acier trempé ou carbure de tungstène	Diamant	Acier trempé	Diamant	Diamant
Forme	Sphère	Cône	Sphère	Pyramide à base carrée	Pyramide à base losange
Dimensions	 $D = 10 \text{ mm} ; 5 \text{ mm} ; 2,5 \text{ mm} ; 1 \text{ mm}$	 $\theta = 120^\circ$	 $D = 1/16'' (1,587 \text{ mm})$ $D = 1/8'' (3,175 \text{ mm})$	 $\theta = 136^\circ$	 $\alpha = 130^\circ$ $\theta = 172^\circ 30'$

Tableau II.1 : Tableau pénétrateurs Brinell, Rockwell, Vickers et Knoop [20].

II.2.3 Procédé avec action statique

Les différentes méthodes d'essai faisant partie de ce procédé sont les essais du domaine macro avec force d'essai $F > 30 \text{ N}$ tels que:

- essai Brinell
- essai Rockwell
- et l'essai Vickers [22].

II.3 Essai de traction

Il s'agit d'un des essais les plus pratiqués et qui permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité, charge de rupture, allongement de rupture notamment. Il consiste à réaliser, dans une éprouvette, un champ de contrainte uniforme uniaxiale de traction et à enregistrer l'allongement résultant [24].

II.3.1 But d'essai

Ces essais permettent de tracer une courbe de traction à partir de laquelle les caractéristiques suivantes peuvent être déduites :

- La déformation élastique en fonction de la force appliquée d'où on peut déduire, connaissant les dimensions de l'éprouvette, le module d'Young.
- la limite élastique souvent notée R_e , ou bien la limite d'élasticité à 0,2% $R_{e0,2}$.
- la déformation plastique.
- la résistance à la traction ou tension de rupture souvent notée R_r .

II.3.2 Principe

L'essai est réalisé sur une machine de traction. On applique progressivement et lentement (sans choc) à une éprouvette cylindrique de formes et de dimensions normalisées, un effort de traction croissant à une éprouvette sur laquelle on a tracé deux repères initialement distants de L_0 , et on mesure simultanément l'effort F et l'allongement.

$$\Delta L = L - L_0$$

II.3.3 Epreuves

L'essai de traction est exécuté soit sur des barres de section constante, soit sur des éprouvettes cylindriques (Fig. II.13), ou prismatiques prolongées de part et d'autre par des têtes d'attache de forme appropriée pour la fixation. Afin de garantir des résultats obtenus sous contrainte uniaxiale, toutes les déterminations faites au cours de l'essai ne portent que sur une partie de la longueur de l'éprouvette.

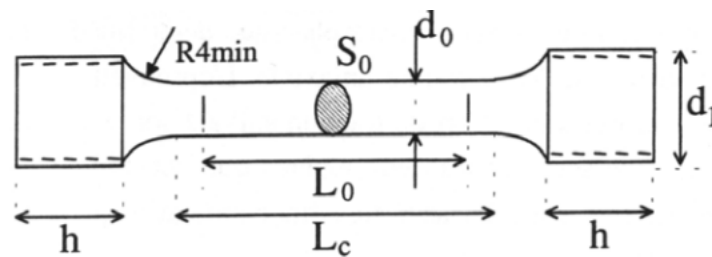


Figure II. 1 : Exemple d'une éprouvette de traction [24].

d_0 = \varnothing partie calibrée

S_0 = section initiale

d_1 = \varnothing des têtes filetées ou diamètre initial

h = longueur des têtes

L_0 = longueur entre repère = $5 d_0$

Conventionnelles:

L_c = longueur calibrée

$L_0 = 5,65 \cdot \sqrt{S_0}$

II.3.4 Machine d'essai

Une machine de traction moderne (Fig. II.14), dispose d'un entraînement électrique réglable pour effectuer des essais simples ou cycliques à vitesse contrôlée. Elle doit être équipée de capteurs de force et d'allongement, ainsi que d'un système d'amarrage. Grâce aux micro-ordinateurs, le contrôle de l'essai et l'acquisition des données sont devenus très simples. Des

capteurs combinés avec des cartes d'acquisition de données, gérés par des logiciels hautement polyvalents, permettent de contrôler des machines pouvant développer des forces de 100 kN, à l'aide de quelques touches [25].

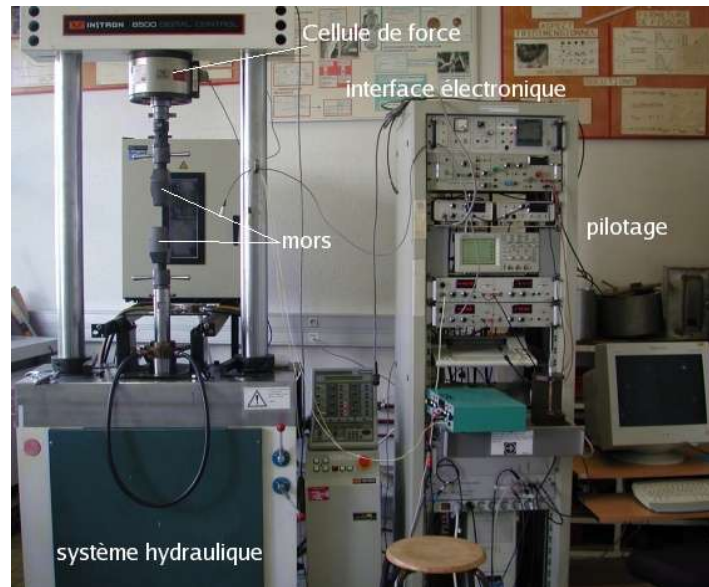


Figure II.2 : Machine de traction [25].

II.3.5 Diagramme de traction

Les valeurs mesurées directement lors d'un essai de traction sont la force F et l'allongement ΔL , plutôt que les contraintes et la déformation. La contrainte σ , rapportée dans un diagramme de traction est la force divisée par la section initiale S_0 de l'éprouvette (contrainte nominale).

$$\sigma = \frac{F}{S_0}$$

De même la déformation, se réfère à la longueur initiale L_0 de la partie délimitée par l'extensomètre (déformation nominale) [29].

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

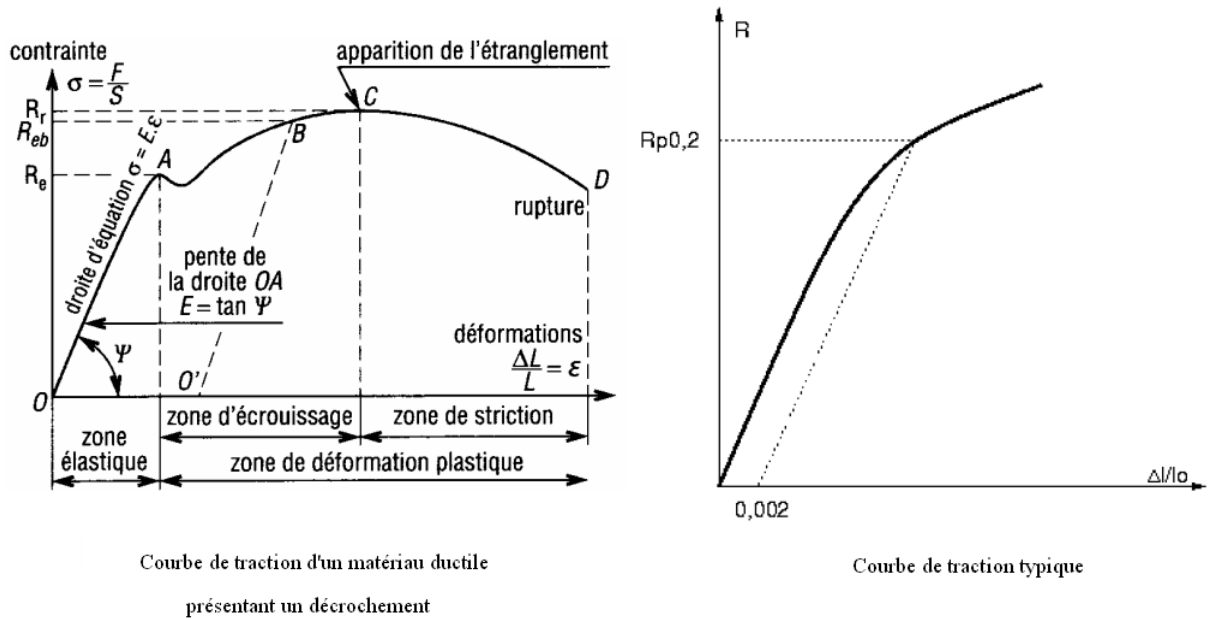


Figure II.3 : Diagramme de traction

Première période : c'est la période élastique ou de résistance à la déformation des matériaux. Si on relâche les forces appliquées avant d'atteindre la limite $(R_e)t_1$ le matériau reprend sa forme initiale, c'est la limite élastique.

Deuxième période : c'est la période de déformation permanente ou période de mise en forme des matériaux. Le matériau se déforme, mais ne rompt pas et gardera la déformation même si on relâche les forces appliquées.

Troisième période : c'est la période de striction ou de décohésion structurale localisée entraînant la rupture de l'éprouvette.

II.3.6 Caractéristiques de l'essai

Limite élastique (Re)t :

C'est la charge unitaire (charge par unité de section) exprimée en hb (hectobar) ou 10^7 Pa (environ 102 kgf/cm² pour les anciens) correspondant à la fin de la première période.

$$(Re)t = \frac{\text{Force élastique}(F_e)}{\text{Section éprouvette}(S_0)}$$

Résistance de rupture (Rr) t :

C'est la charge unitaire maxi que peut supporter l'éprouvette avant rupture exprimée en hb (hectobar) ou 10^7 Pa (environ 1,02 kgf/mm² pour les anciens)

Allongement (A %) :

C'est le rapport de changement de longueur après rupture de la partie travaillante (l_0) exprimé en %.

$$A\% = \frac{l_f - l_0}{l_0} \cdot 100 = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100$$

Striction (Z%) :

C'est le rapport de changement de section après rupture

$$Z\% = \frac{S_f - S_0}{S_0} \cdot 100$$

Dans cette expression, L_0 et L_f sont respectivement les longueurs initiales et finales après rupture.

Module d'élasticité longitudinal ou module de YOUNG :

Il caractérise la stabilité dimensionnelle sous charge pendant la première période. C'est le rapport de la charge unitaire sur l'allongement unitaire correspondant dans la première période de proportionnalité.

$$E = \frac{(Re)t}{\frac{\Delta l}{l_0}}$$

Plus le module est important et plus la stabilité dimensionnelle de la pièce est grande.

CHAPITRE III

DESCRIPTION DE L'APPAREIL REALISE

III.1 Description de la machine de fluage

En général, les essais de fluage sont réalisés sur des machines à charge constante utilisant la force de pesanteur : une masse est fixée à l'éprouvette ou, bien souvent, pour les essais de longue durée, un système d'amplification de la charge à bras de levier est utilisé.

Notre dispositif de fluage est composé d'un bâti et d'un bras de levier relié à une chaîne relié à un mors mobile sur lequel l'éprouvette est fixée dans le mors fixe et d'un four électrique et thermorégulateur (fig. III.1).

La machine de fluage que nous avons réalisé est d'une capacité de 268.51 N à levier à force constante. La force est imposée par un ensemble de masses calibrées via un levier qui permet d'appliquer une multiplication de l'effort d'un facteur 10.83.

L'allongement de l'éprouvette est mesuré par un système d'acquisition lié à un ordinateur.

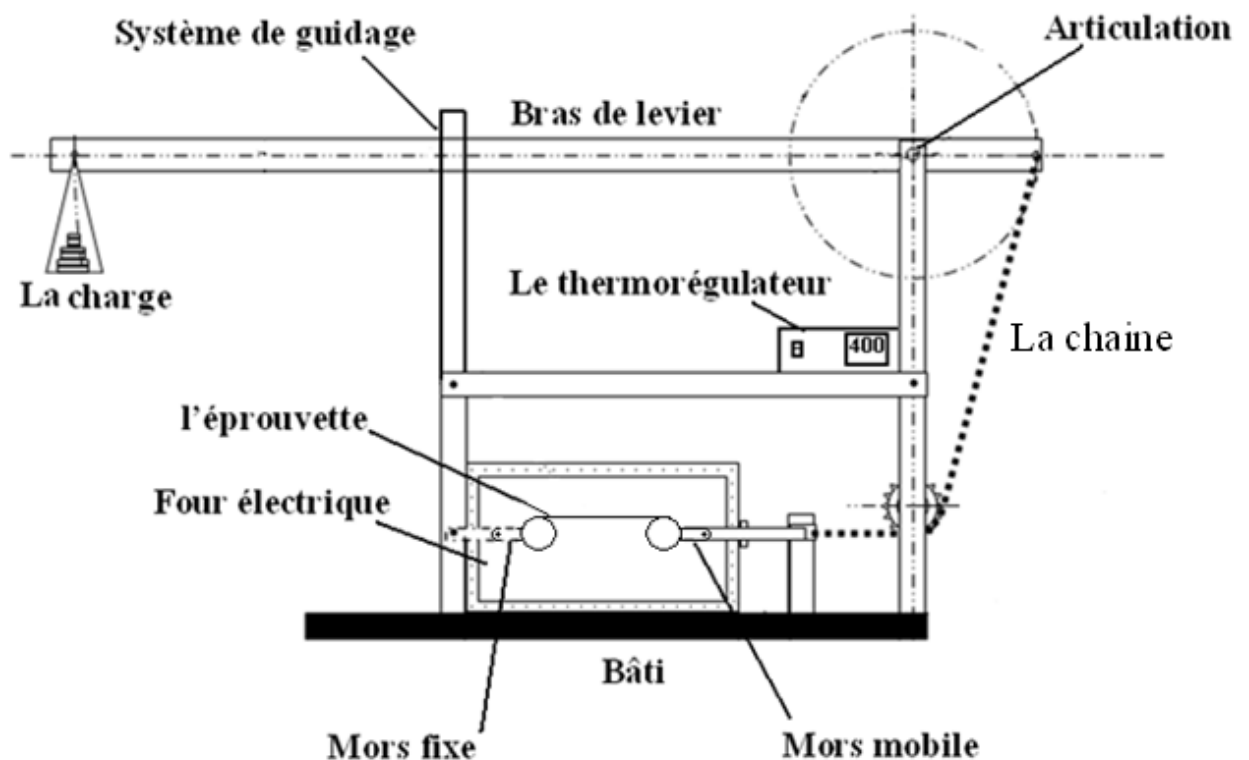


Figure III.1 : Schéma d'une machine de fluage

III.2 Conception de la machine

Notre but consiste à réaliser une machine de fluage qui servira comme un support d'équipement pour le laboratoire de recherche des sciences des matériaux. Pour la réalisation de cette machine nous avons procédé tout d'abord à l'établissement de :

- Schéma de principe de l'ensemble.
- Dessin de définition de chaque pièce.
- Dessin d'ensemble de la machine.
- Dessin d'ensemble du four électrique.

Ensuite nous avons choisi un matériau convenable pour chaque élément de la machine suivi d'un calcul de résistance aux différentes sollicitations qui lui sont appliquées.

Finalement nous avons procédé à l'usinage des différentes pièces et ensuite le montage de l'ensemble.

Les constituants de la machine sont :

- Bâti.
- Bras de levier.
- Mors mobile.
- Mors fixe.
- Système de guidage.
- La chaîne.
- Axe et pignon.
- Porte La charges.
- Four électrique.
- Thermorégulateur.

III.2.1 Bâti

Le bâti se compose de deux parties, à savoir la base et le support (Fig. III.2).

III.2.1.1 La base

La base de la machine de fluage qui est composé de cinq pièces essentielle en acier et qui seront présentées successivement.

Les pièces 1 et 2: composent le levier. Il a une longueur de 1000 mm et une section carrée de distance 50×50 mm et une épaisseur de 5 mm. Les deux pièces fabriquées en acier, et forment la base de l'appareil.

Les Pièces 3 et 4, des cornières en acier, de longueur 360 mm et de section $50 \text{ mm} \times 50$ mm et une épaisseur de 5 mm. Les pièces 3 et 4, sont montées sur les pièces 1 et 2.

La pièce 5 : est une cornière en acier, de longueur 360 mm et de section $50 \text{ mm} \times 50$ mm, La pièce 5 est montée sur les pièces 1 et 2.

III.2.1.2 Le support

Le support de l'appareil de fluage est composé de six pièces essentielles en acier (Fig. III.2).

Les pièces 1 et 2 : de longueur 1100 mm et de section carré 50×50 mm fixées verticalement sur la base, La fonction des pièces 1 et 2 est de porter le bras de levier.

Les pièces 3 et 4 : fabriquées en cornières de longueur 1100 mm et de section carrée 50×50 mm fixées verticalement sur la pièce 5. Les pièces 3 et 4 ont deux rôles :

- Porteur du bras de lever, en mouvement et au repos.
- Guidage du bras de lever en mouvement.

Les pièces 5 et 6 : aussi fabriquées de deux cornières de longueur 805 mm et de section carré de distance 30×30 mm et fixé horizontalement sur et entre 1,2 et 3,4 fonction de les pièces 5 et 6 rigidité de l'appareil et portage du thermocouple.

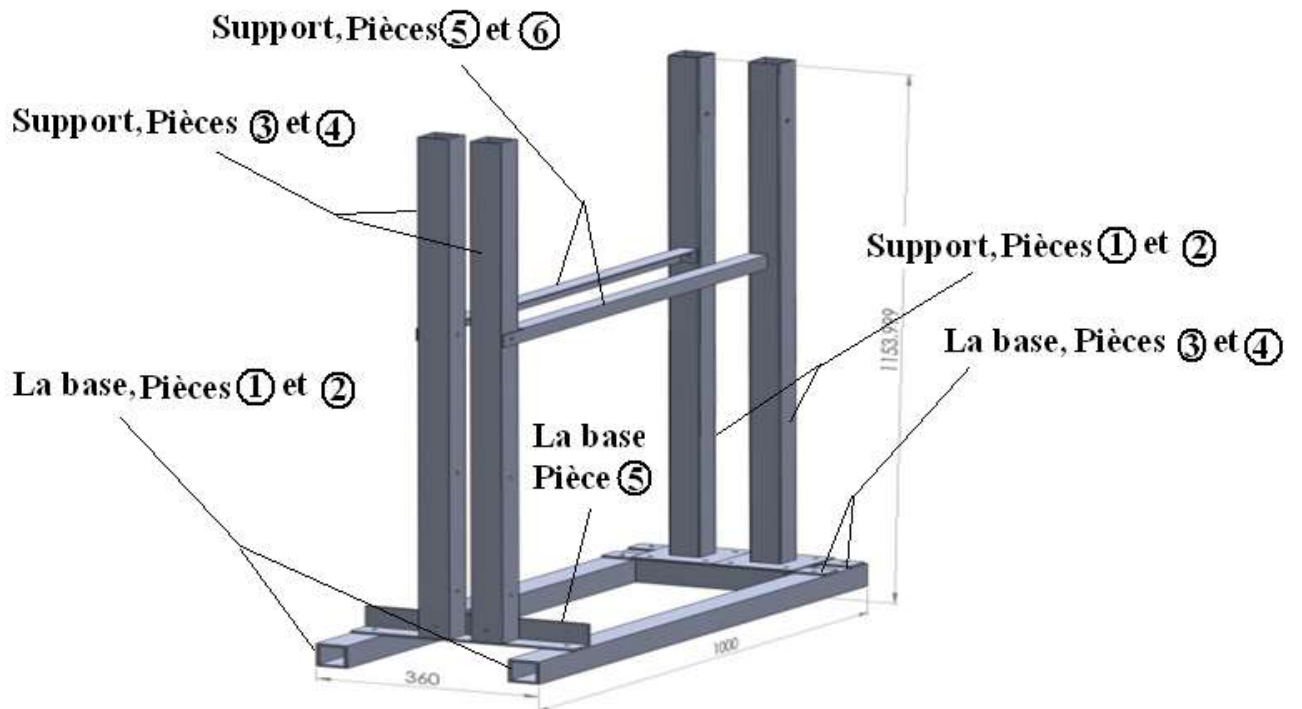


Figure III.2 : Dessin d'ensemble du bâti

III.2.2 Bras de levier

C'est un élément important dans le dispositif, fabriqué en acier, de longueur 2200 mm et de section rectangulaire de 60x30 mm. L'intérêt du bras de levier (Fig. III.3) est de multiplier l'effort (force) appliqué sur l'éprouvette pendant l'essai de fluage.

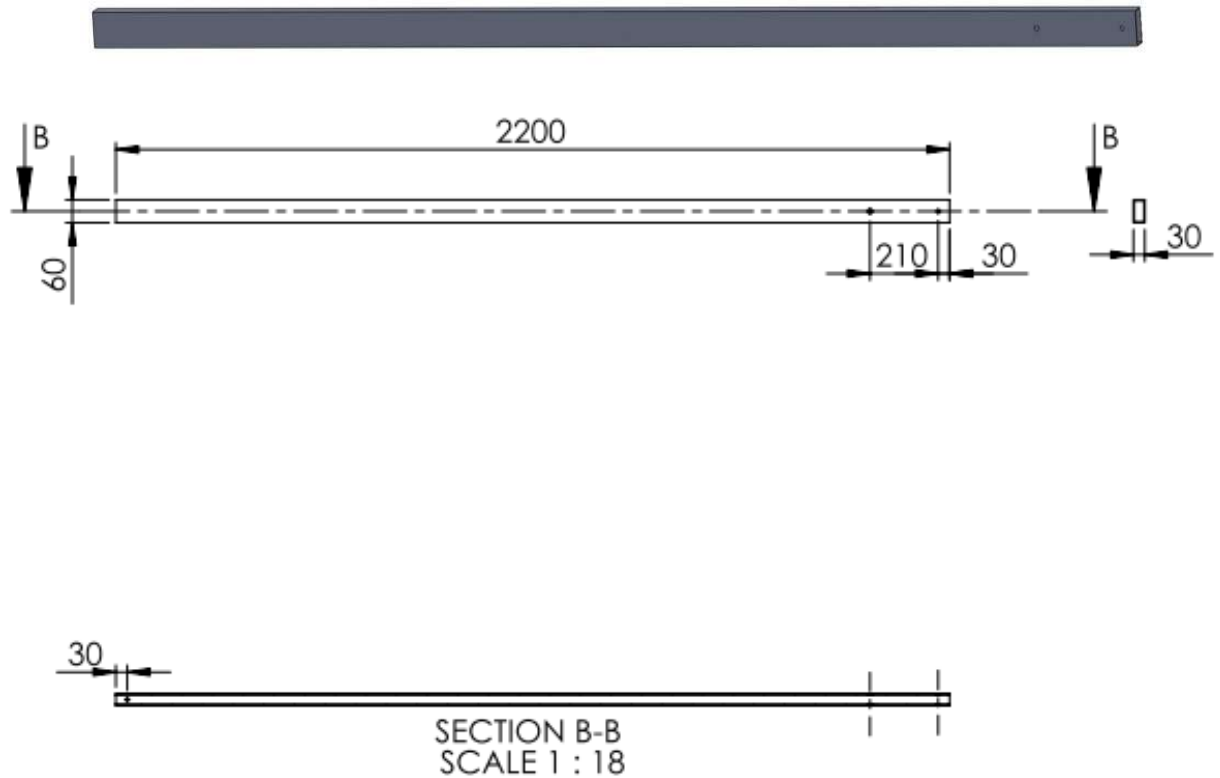


Figure III.3 : Dessin de définition de bras de levier

III.2.2 Mors mobile et mors fixe

Les deux mors représentant les éléments les plus importants dans le dispositif (Fig. III.4), Ils sont en acier traité, la fonction des mors est la fixation de l'éprouvette, Ils sont composés de deux pièces (une tige et un anneau).

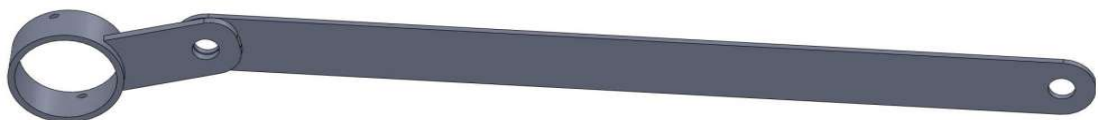


Figure III.4 : Dessin de mors mobile et fixe

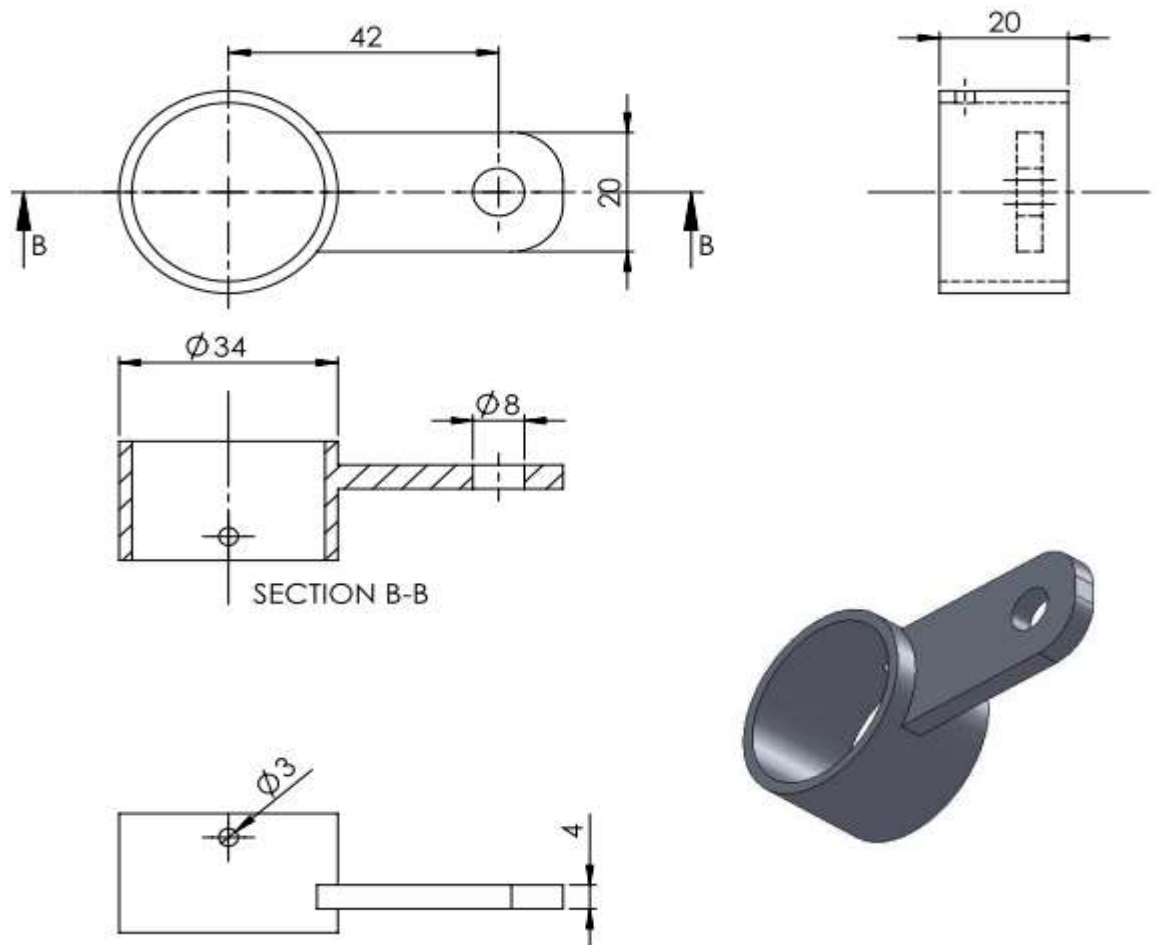


Figure III.5 : Dessin de définition des anneaux des mors mobile et fixe

III.2.4 Axe et pignon

Axe

Fabriqué en acier et usiné sur le machine de tour parallèle. La fonction de cet axe et la transmission (Fig. III.6), et de provoquer le mouvement rotatif du système d'acquisition.

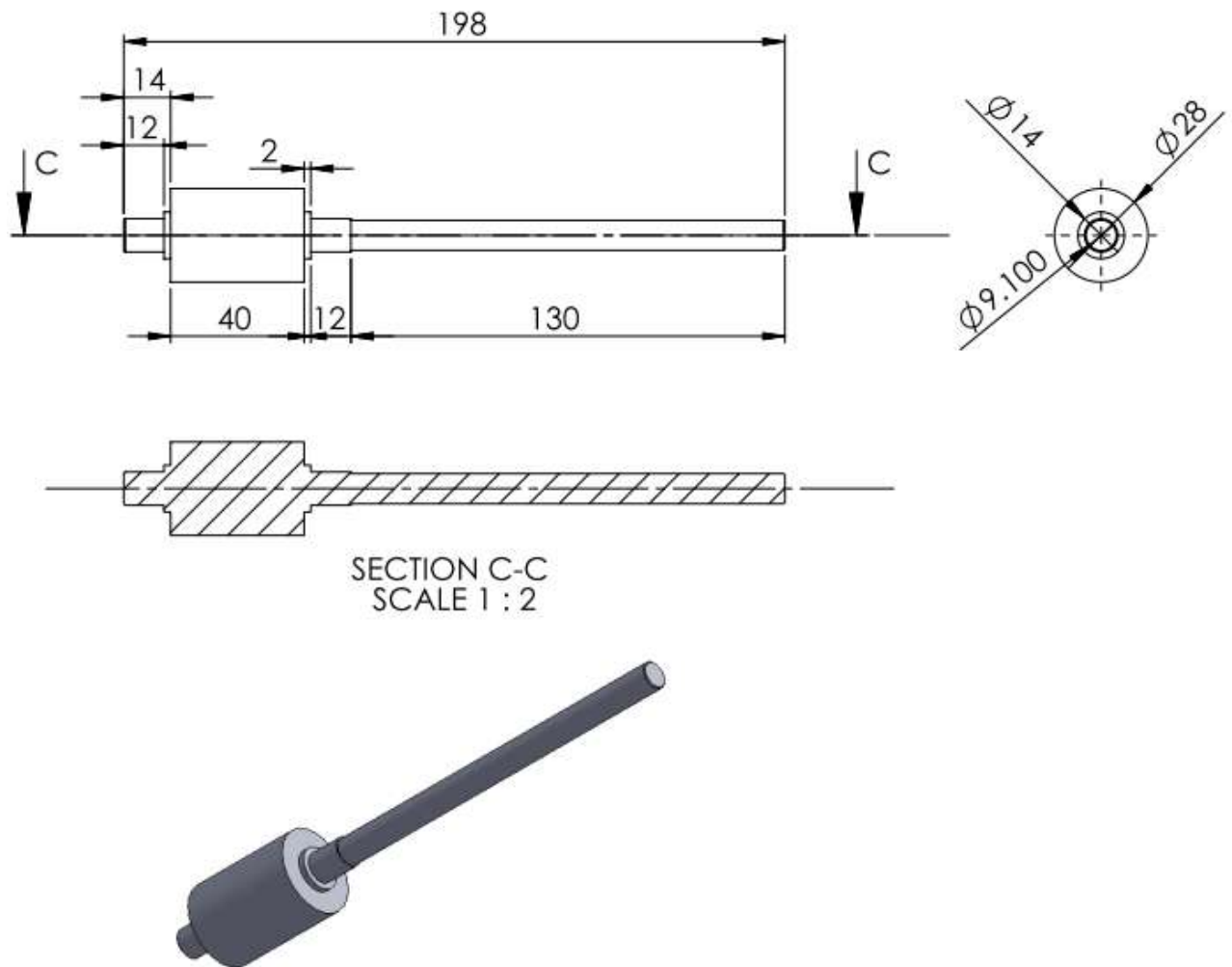


Figure III.6 : Dessin de définition d'axe de transmission

Pignon

Le Pignon (Fig. III.7) est fixé sur l'axe pour engrainer avec la chaîne de traction pour transformer le mouvement de translation de l'éprouvette en mouvement de rotation.

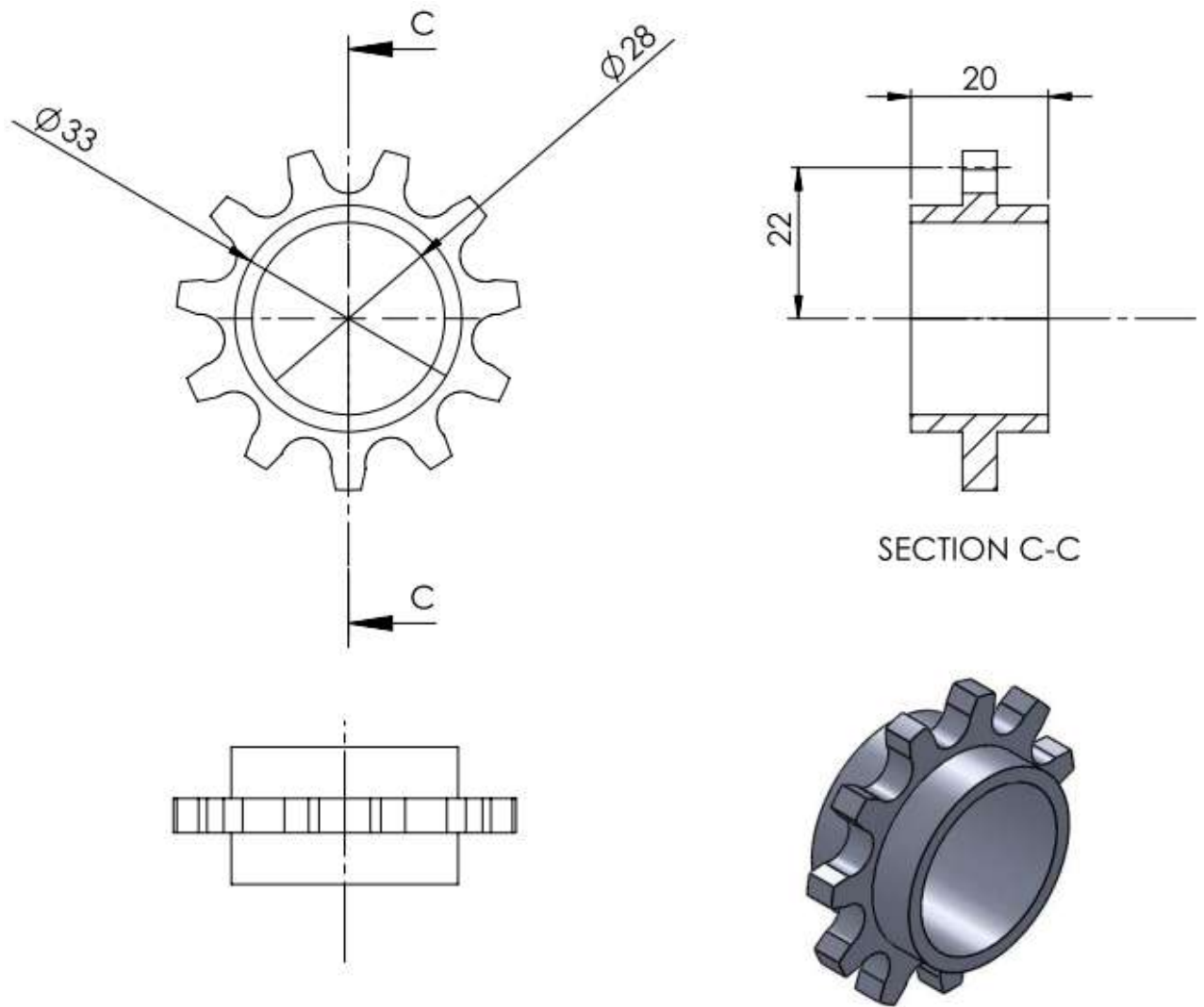
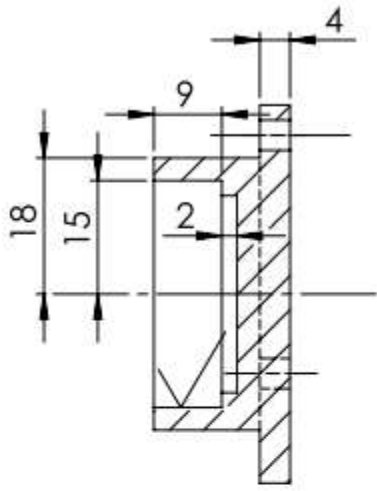


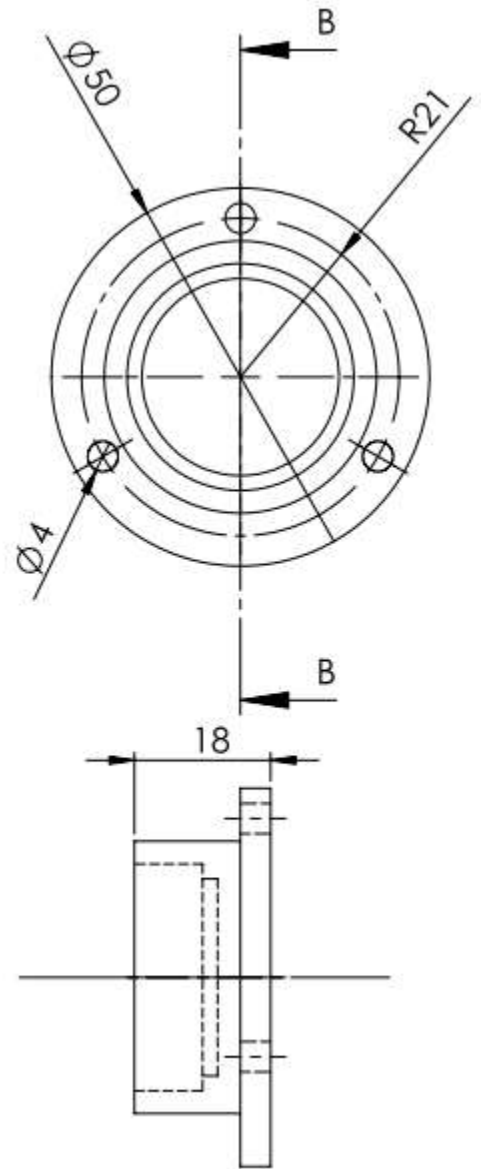
Figure III.7 : Dessin de définition de pignon

III.2.5 Couvercle de roulement

Couvercle (Fig. III.8) en acier, réalisé sur le tour parallèle, pour une bonne localisation de roulement.



SECTION B-B



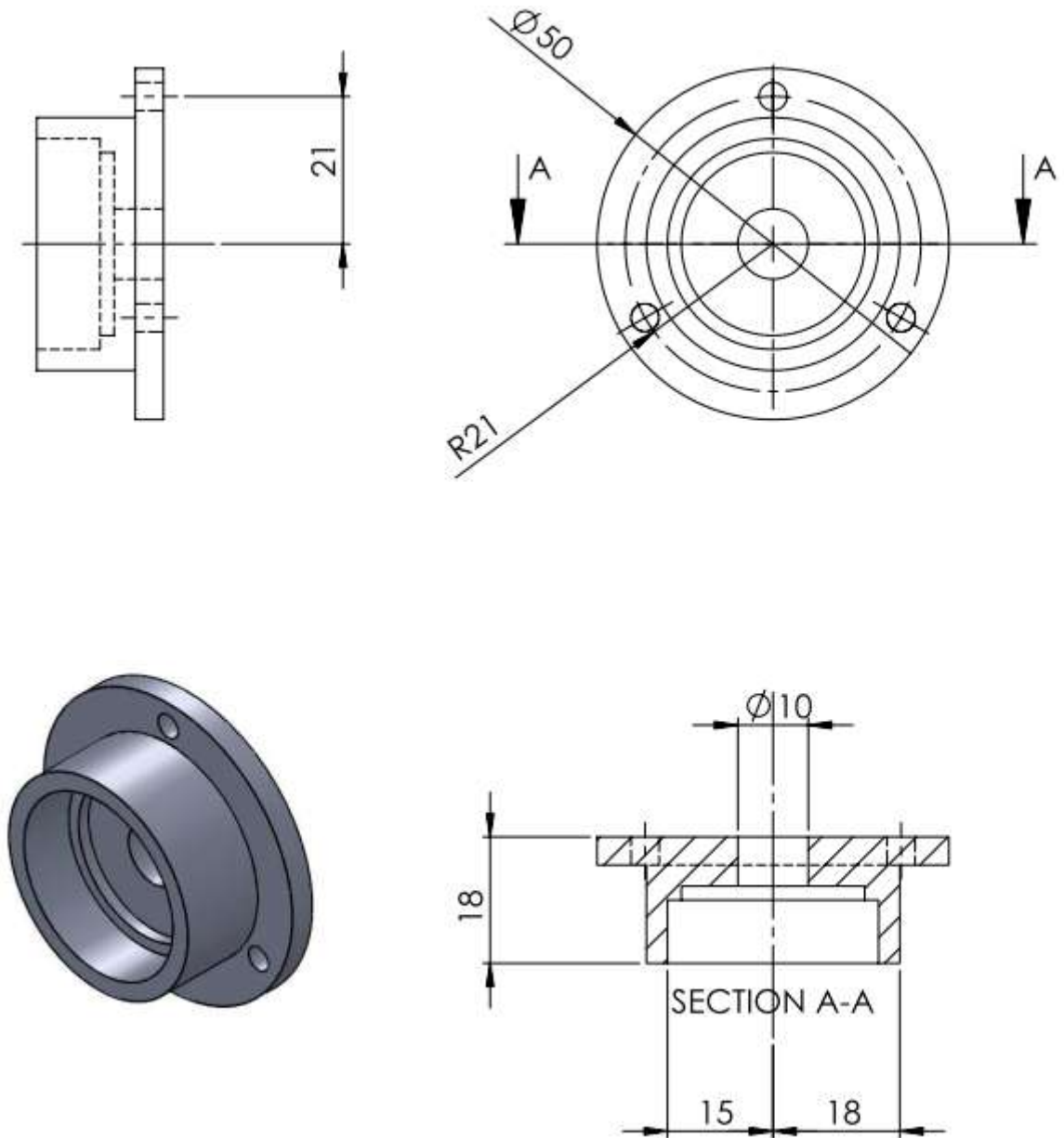


Figure III.8 : Dessin de définition de couvercle

III.2.6 Roulement

Le roulement (Fig. III.9) est un type BC (roulement a une rangée de billes, a contact radial) et qui résiste forces radiales.

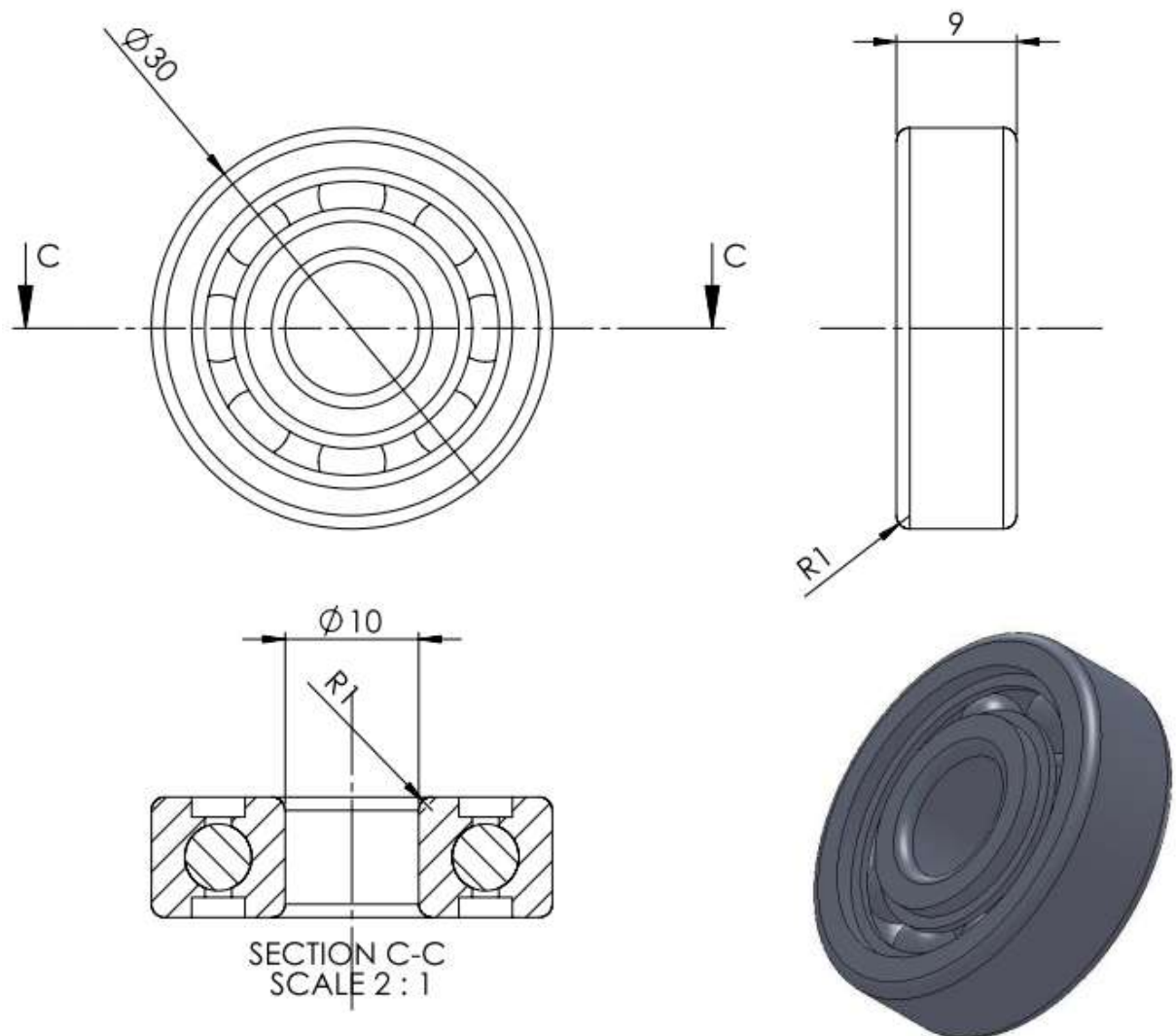


Figure III.9 : Dessin de définition de roulement

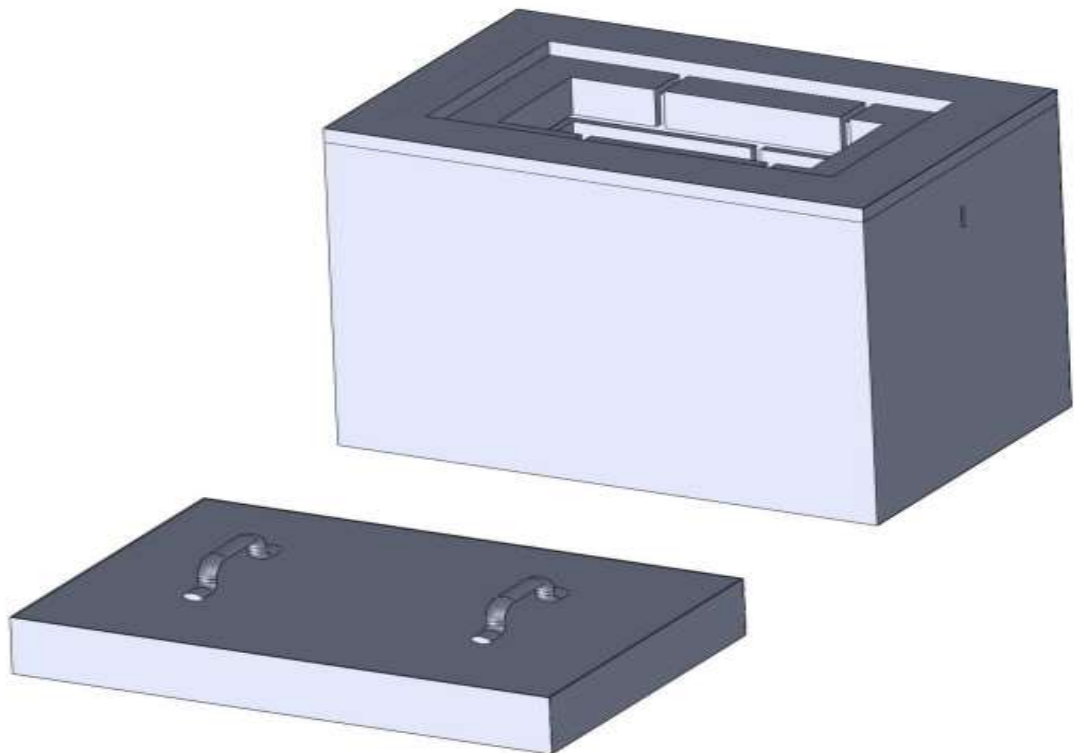
III.2.7 Four électrique

Pour effectuer des essais de fluage, nous avons conçu un four électrique (Fig. III. 10) qui s'adapte selon nos objectifs expérimentaux.

Les constituants du four électrique sont:

- Résistance électrique.
- Briques réfractaires.
- Ciment réfractaires.
- Boitier en acier.
- Line de verre.
- Thermorégulateur.

..



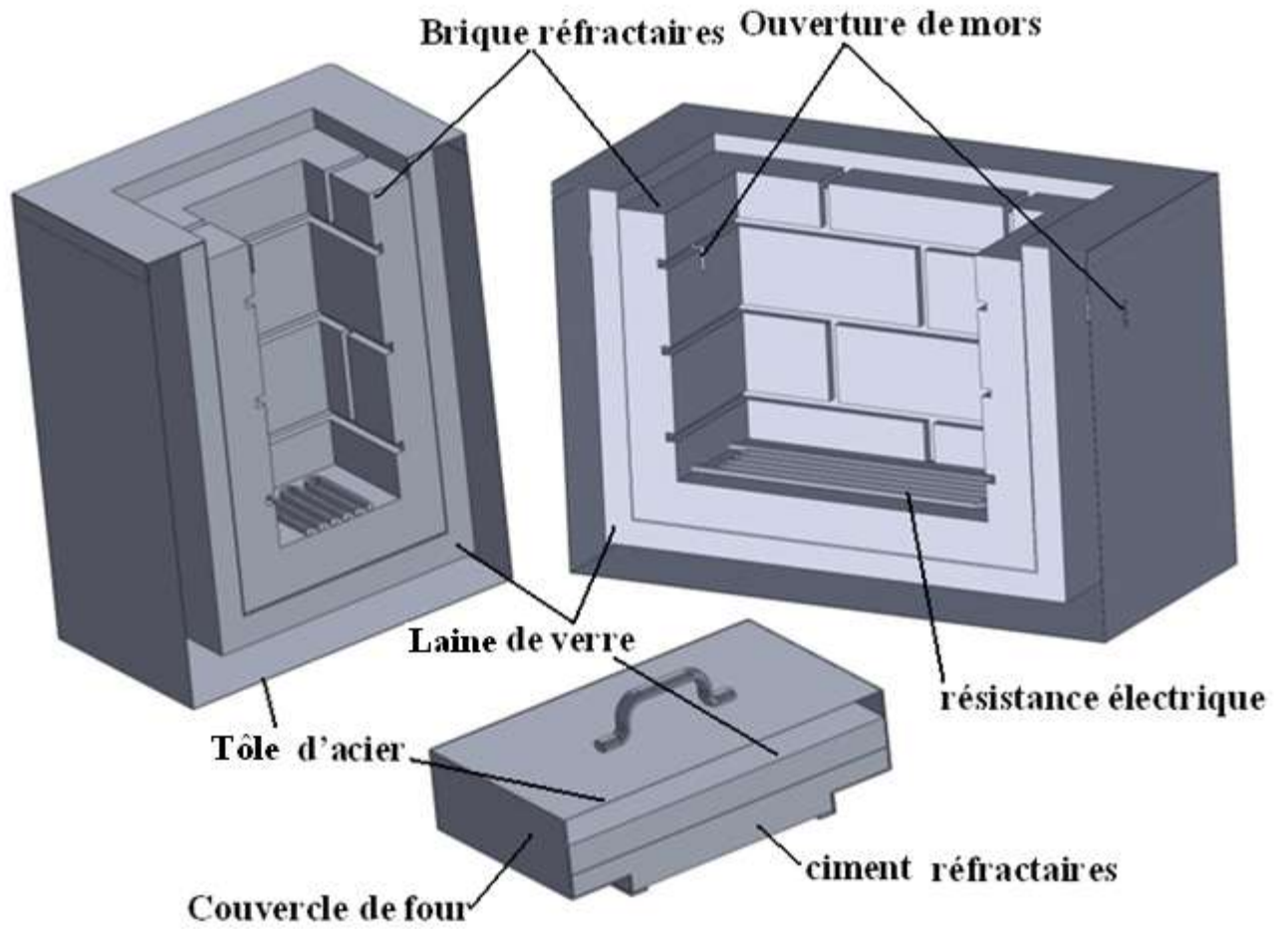


Figure III.10 : Dessin de four

III.2.7.1 Conception du four

Les fours à résistances (Fig. III.11) comprennent essentiellement:

- Une chambre de chauffe fabriquée en brique réfractaire collé par le ciment réfractaire.
- Une enceinte intérieure en tôle d'acier pour supporter la brique réfractaire.
- Un matériau isolant (laine de verre) placé entre l'enceinte intérieure et l'enceinte extérieure.
- Le vide entre l'enceinte extérieure et le matériau isolant pour diminuer la perte de chaleur.
- Une carcasse, métallique, assurant la rigidité du four.
- Des résistances électriques constituant le corps de chauffe et leur dispositif d'alimentation.
- Un système de régulation de la température (thermorégulateur).



Figure III.11 : Le four électrique

III.2.8 Thermorégulateur

Le contrôle de température effectué par un thermorégulateur avec une plage de travail de 0 à 400 °C et un thermocouple de type J avec une précision de $\pm 2^\circ\text{C}$ placé au contact de l'éprouvette.



Figure III.12 : Thermorégulateur

III.2.9 Système d'acquisition

Le système fonctionne pour transformer le mouvement de rotation (Le mouvement de l'échantillon à la traction), les signaux et les renvoie à l'ordinateur qui prouve ces signaux comme suit <1 1> <1 2> <1 3> <19006 1452>, Les secondes sont à gauche et à droite représentent la déformation.

III.3 Etude de la résistance

III.3.1 Etude de la résistance à la flexion du bras de levier

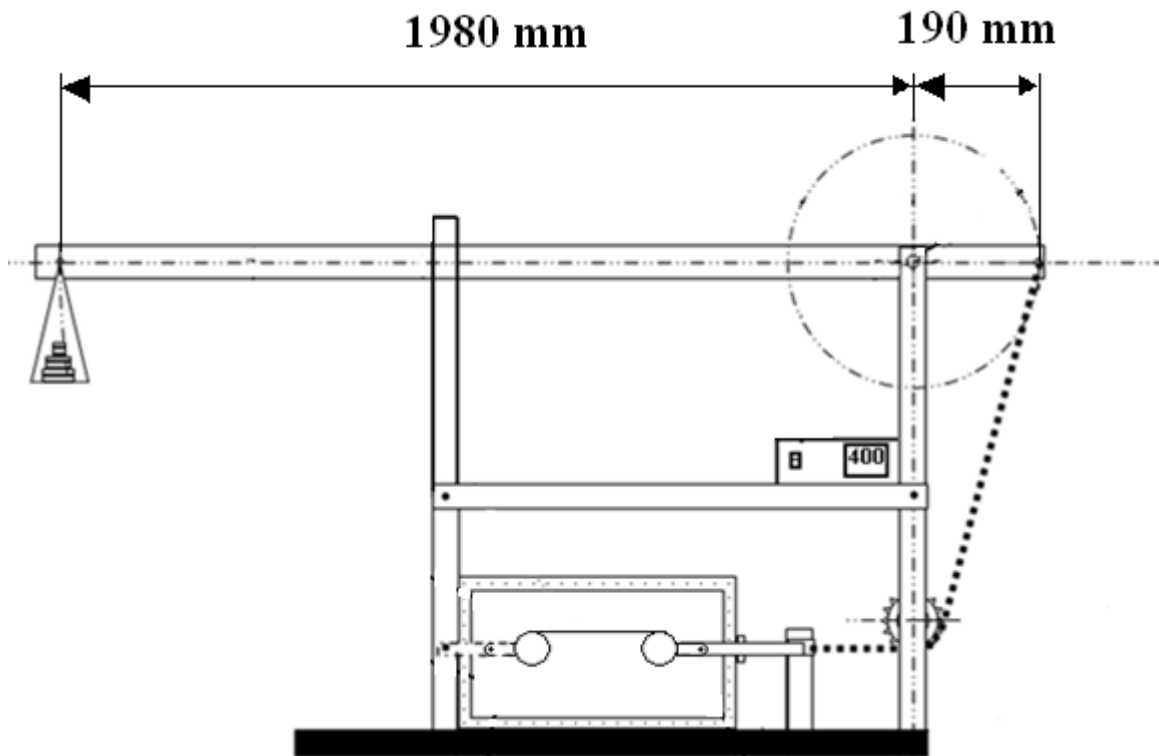
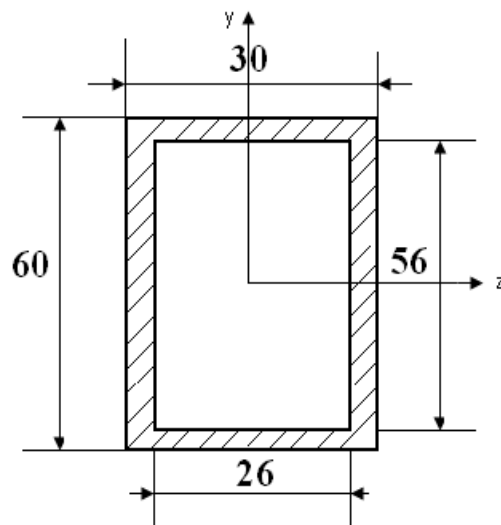


Figure III.13 : Schéma de la machine de fluage



Section A-A

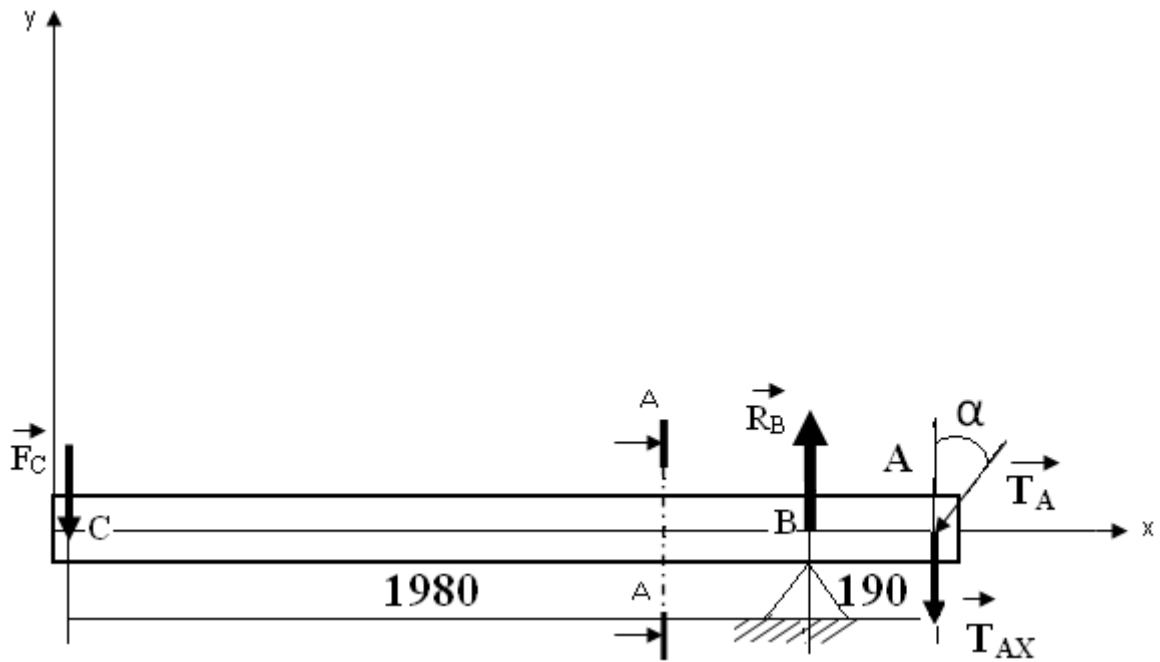


Figure III.14 : Schéma représentatif des forces appliquées sur le bras de levier

III.3.2 La condition de résistance de bras de levier:

$$\sigma \leq \sigma_p$$

$$\sigma_p = 100 \text{ N/mm}^2 \quad [44].$$

$$\sigma = \frac{M_{\max}}{I_{GZ}/v}$$

Calcul de moment fléchissements maximal M_{\max}

Etudions la zone BC :

$$1980 \geq X \geq 0$$

$$M_{(x)} = -F_c \cdot x$$

$$X=0, M_{(0)}=0$$

$$X=1980, M_{(1980)} = F_c \cdot 1980$$

$$M_{\max} = F_c \cdot 1980$$

Calcul du moment quadratique

$$I_{GZ} = \frac{B H^3}{12} - \frac{b h^3}{12}$$

$$I_{GZ} = \frac{30 (60)^3}{12} - \frac{26 (56)^3}{12}$$

$$I_{GZ} = 159498.66 \text{ mm}^4$$

$$v = \frac{H}{2} = 30$$

$$\sigma = \frac{F_c \cdot 1980}{159498.66 / 30}$$

$$\frac{F_c \cdot 1980}{159498.66 / 30} \leq 100$$

$$0.372 F_c \leq 100$$

$$F_c \leq 268.51 \text{ N}$$

$$F_c \leq 27 \text{ Kg}$$

D'après (Fig. III.14), Le bras de levier est sollicité par une flexion sous l'action de trois forces T_{AX} , R_B , F_C , tel que la charge $F_C = 268.5 \text{ N}$. (sous une masse maximal = 27 kg).

Nous pouvons calculer la force T_A et la réaction R_B comme suit :

$$\Sigma F_{ext} = 0 \text{ ----- (1).}$$

$$\Sigma M_{f_{ext}/B} = 0 \text{ ----- (2).}$$

$$\text{De (1), nous pouvons écrire } \vec{T}_{AX} + \vec{F}_C - \vec{R}_B = \vec{0}.$$

$$\text{Par projection des forces sur l'axe y on aura } R_B = T_{AX} + F_C \text{ -----(3).}$$

$$\text{De (2), } M\vec{T}_{AX/B} + M\vec{R}_B/B + M\vec{F}_C/B = 0. \text{ ----- (4)}$$

$$T_{AX} \cdot 190 - (F_C \cdot 1980) = 0, \text{ ce qui donne } T_{AX} = \frac{F_c \cdot 1980}{190}.$$

$$T_{AX} = 2798 \text{ N, donc de (3) on trouve } R_B = 3066.5 \text{ N}$$

Effort tranchant

Etudions la zone AB:

$$190 \geq X \geq 0$$

$$T_1 = -T_{AX} = -2798 \text{ N}$$

Etudions la zone BC:

$$2170 \geq X \geq 190$$

$$T_2 = -T_{AX} + R_B = -2798 + 3066.5 = 268.5 \text{ N}$$

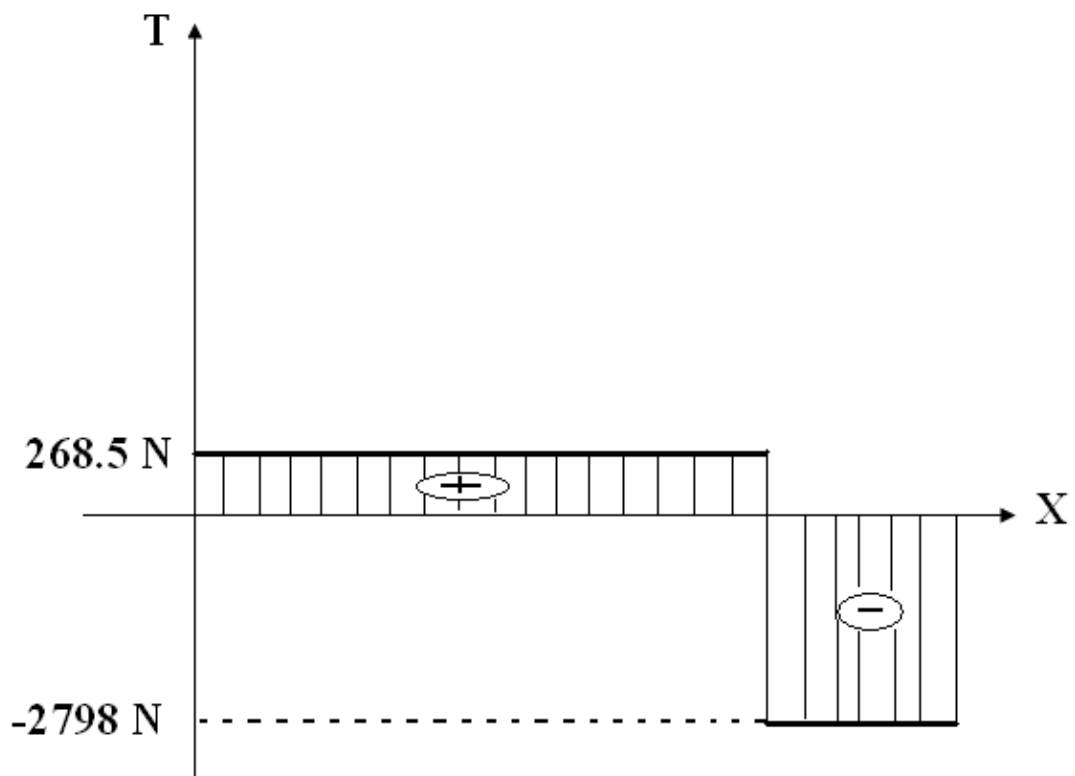


Figure III.15 : Diagramme d'effort tranchant.

Moment fléchissant

Etudions la zone AB:

$M_{fl_{AB}} = T_{AX} \cdot X$, si $X = 0$ donc $M_{fl_{AB}} = 0$, si $X = 190$ donc

$$M_{fl_{AB}} = 2798 \cdot 190 = 531620 \text{ N.mm},$$

Etudions la zone BC:

$M_{fl_{BC}} = -F_C (X-2170)$, si $X = 190$ donc $M_{fl_{BC}} = 531630 \text{ N.mm}$,

si $X = 2170$ donc $M_{fl_{BC}} = 0 \text{ Nmm}$

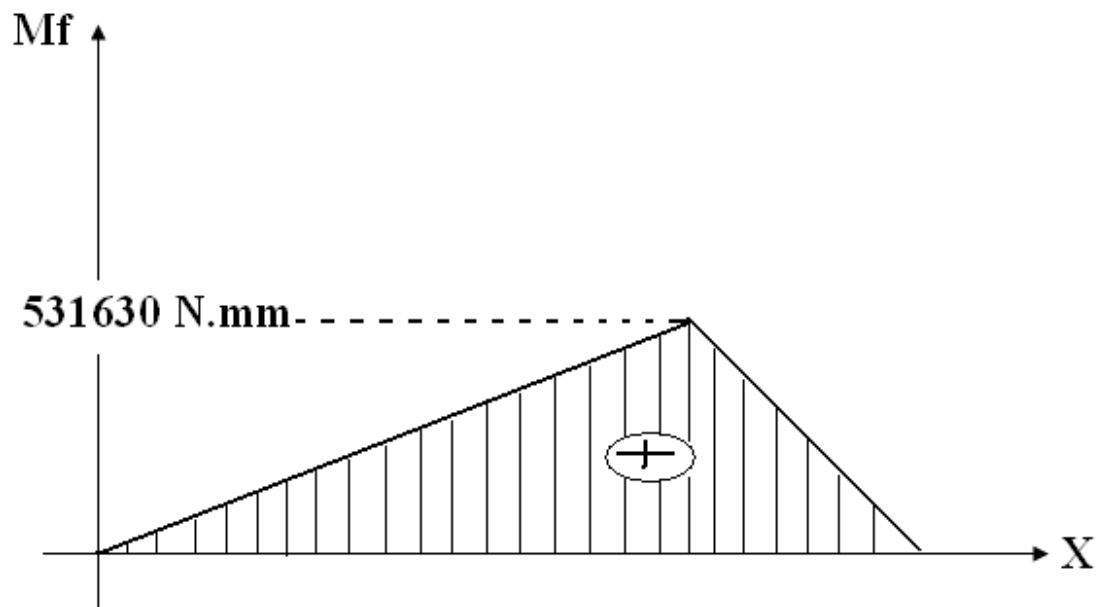


Figure III.16 : Diagramme de moment fléchissant.

III.3.3 Etude de la résistance au cisaillement de l'axe de l'articulation:

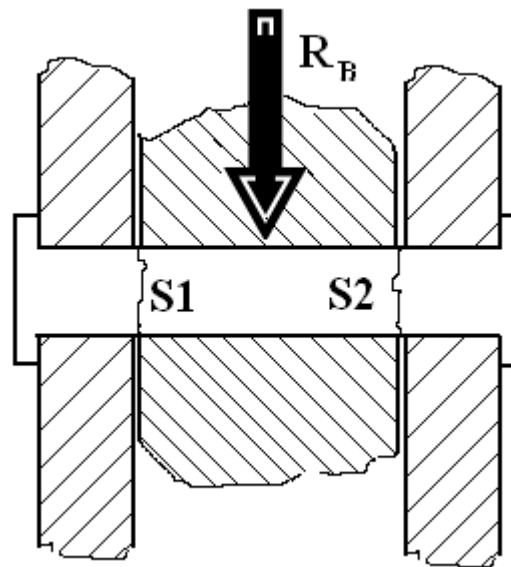


Figure III.17 : Schéma représentatif la force appliquée sur l'axe d'articulation de bras de levier.

A partir de l'effort de réaction R_B calculé auparavant nous pouvons vérifier la résistance au cisaillement de l'axe de l'articulation :

La condition de résistance d'axe d'articulation

La matière d'axe acier de $R_e = 500 \text{ N/mm}^2$

$$\frac{T}{S} \leq \tau_p \text{ d'où } \frac{T}{\tau_p} \leq S$$

Remarquons qu'il ya deux sections cisillées, donc

$$T = \frac{R_B}{2} \text{ avec } \tau_p = \frac{\tau_e}{s}$$

$$R_B = 3066.5 \text{ N}$$

$$\tau_e = 0.7 R_e$$

$$\tau_e = 0.7 \times 500 = 350 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{Le coefficient de sécurité } s = 5, \text{ donc } \tau_p = \frac{350}{5} = 70 \text{ N/mm}^2$$

Avec $S = \pi r^2$, la relation (III.) s'écrit :

$$S \geq \frac{R_B}{2 \tau_p} \quad \text{Donc } R \geq \frac{R_B}{2 \pi \tau_p}$$

$$R \geq \sqrt{\frac{3066.5}{2 \cdot 3,14 \cdot 70}} = 2.64 \text{ mm}$$

Le diamètre d'axe d'articulation $\varnothing = 8 \text{ mm}$ pour résiste bien au cisaillement.

III.3.4 Etude de la résistance au cisaillement de l'axe de transmission:

La condition de résistance d'axe transmission

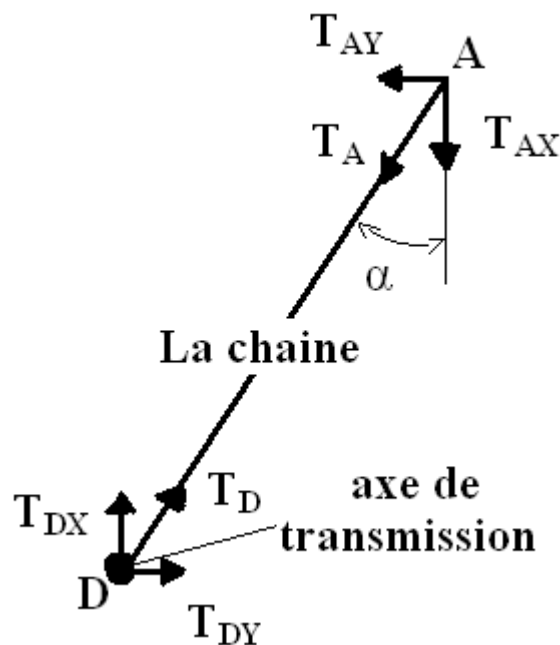


Figure III.18 : Schéma représentative de force applique sur l'axe transmission

Le même condition et le même cas d'axe d'articulation mais la force de cisaillement différent.

$$\frac{T}{\tau_p} \leq S$$

$$T_{AX} = 2798 \text{ N}$$

$$T_{DX} = 2798 \text{ N}$$

$$\tau_e = 0.7 \times 500 = 350 \text{ N/mm}^2$$

Le coefficient de sécurité $s = 3$, donc $\tau_p = \frac{\tau_e}{s} = \frac{350}{3} = 70 \text{ N/mm}^2$

$$R \geq \sqrt{\frac{2798}{2 \cdot 3,14 \cdot 70}} = 2,52 \text{ mm}$$

Le diamètre d'axe de transmission $\varnothing = 8 \text{ mm}$ pour résiste bien au cisaillement.

III.3.5 Etude de la résistance au cisaillement de la vis d'anneau :

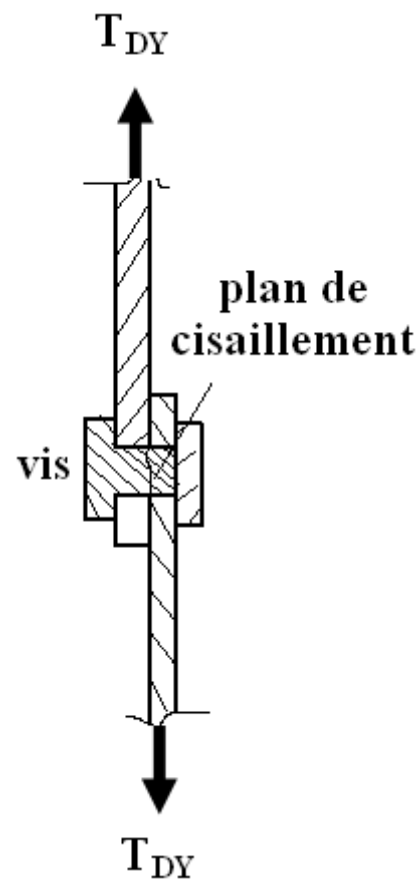


Figure III.19 : schéma représentative de force appliquée sur les vis des anneaux

Comme la vis 15 est soumise au cisaillement sous l'effort T_{DY} calculé Auparavant, la condition de résistance s'écrit:

$$\frac{T}{S} \leq \tau_p \text{ d'où } \frac{T}{\tau_p} \leq S$$

$$\tau_p = \frac{\tau_e}{S}$$

$$T_{DY} = T_{DX} \cdot \text{tng } \alpha = 2798 \cdot \text{tng } (17.85^\circ) = 901 \text{ N}$$

le coefficient de sécurité $s = 5$

$$\tau_e = 0.7\sigma_e$$

La vis est en acier mi- dur alors $\sigma_e = 500 \text{ N/mm}^2$.

$$\tau_e = 0.7 \times 500 = 350 \text{ N/mm}^2.$$

$$\text{donc } \tau_p = \frac{\tau_e}{s} = \frac{350}{5} = 70 \text{ N/mm}^2$$

Avec $S = \pi R^2$, la relation (III.) s'écrit :

$$S \geq \frac{T_{DY}}{\tau_p} \text{ Donc } R \geq \frac{T_{DY}}{\pi \tau_p}$$

$$R \geq \sqrt{\frac{901}{3,14 \cdot 70}} = 2.02 \text{ mm}$$

Le diamètre de vis des anneaux $\emptyset = 6 \text{ mm}$ pour résiste bien au cisaillement

Conclusion

Le but de notre travail était l'étude de comportement au fluage des fils de cuivre tréfilés et des fils tréfilés et recuits, Ce comportement est étudié lors de plusieurs essais de fluage.

Pour aboutir à notre résultat, nous avons réalisé un appareil d'essai de fluage. Le choix de conception de l'appareil selon nos besoins expérimentaux.

Suite aux résultats obtenus, sur le fluage des fils tréfilé de pré déformation $\varepsilon=(94.94\%$ et $85.94\%)$, nous pouvons résumer les résultats acquis lors de cette étude comme suit :

- * L'effet de la contrainte selon les conditions de fluage choisi, que lors de l'augmentation de la contrainte et la fixation de la température qu'il y à une augmentation de la déformation enregistré ($\varepsilon\%$), et de la vitesse de déformation stationnaire (ε_{\min}) tandis que, le temps de rupture a diminué d'une manière générale
- * De même la variation de la température de fluage provoque le même effet que l'augmentation de la contrainte. Nous avons fait subir à nos fils tréfilés un traitement de recuit à une température de 500°C pendant des temps de maintien variant de 2mn à 2h. Nous avons remarqué que le fluage de ces fils à 240°C et sous 162MPa présente:
 - * Nous avons constaté l'apparition des trois stades de fluage dans toutes les allures des courbes de fluage.
 - * Nous avons remarqué une importante ductilité dû au traitement appliqué. Ce traitement favorise un adoucissement du matériau.
- * On constate que le fil traité pour un temps de maintien de 2mn, présente un temps de rupture important, par rapport au fil tréfilé non traité, ce qui indique sa plus grande résistance au fluage.
- * La microscopie optique a montré que la taille des grains est fonction du temps de maintien, c'est-à-dire l'effet de la recristallisation primaire.
- * L'observation au MEB a montré le mécanisme de rupture où des cavités sont formées dans la zone de rupture.
- * Les essais de traction ont confirmé les résultats des essais de fluage.
- * La diffraction des rayons X a montré le phénomène de texture dans notre matériau, c'est-à-dire une orientation préférentielle des grains sous l'effet de fluage.

En perspective, vu l'importance du traitement nous recommandons d'orienter la recherche pour trouver le meilleure traitement de recuit pour l'obtention d'un fil résistant au fluage, avec une déformation approprié, c'est-à-dire une durée de vie plus grande.

Tableau de source

- [1] I. Ammara, *Micro-structures des matériaux*, Ecole de technologie Supérieure, Marseilleed, (2009).
- [2] I.Lakhtine, *Métallographie et traitements thermiques des métaux*, édition Mir ed, (1982).
- [3] A. Pineau, "Propriétés physico-chimiques des matériaux," université Paris-sud, (2000).
- [4] L. B. A. Begat, G. Bellocq, A. Benros, C. Bernez, "Les Défauts Du Réseau Cristallin," (2010).
- [5] M. Dupeux, *aide-mémoire science des matériaux*, Edition Dunod ed, (2005).
- [6] S. Jakani, "Effets des impuretés sur les mécanismes de recristallisation du cuivre tréfilé," Université Paris sud-Orsay, (2004).
- [7] D. A. Hughes, N. Hansen, *Materials Science and Technology*, (1991).
- [8] D. A. Hughes, *Proceedings of the Sixteenth Riso International Symposium on Material Science 21*, Edited by N. Hansen, D. Juul Jensen, Y.L. Liu, B. Ralph, Roskilde, Denmark ed, (2000).
- [9] A. S. M. M. Hatherly *Metals Tech*, (1979).
- [10] N. Hansen, *Scripta Metallurgica and Materialia*, (1992).
- [11] D. A. H. R.D. Doherty, F.J. Humphreys, *Current issues in recrystallization*, vol. A238, (1997).
- [12] C. Perdrix, "Comportement mécanique et évolution structurale de l'aluminium au cours de la déformation à chaud," l'Ecole des Mines de Paris, (1983).
- [13] H. Tsukahara, "Etude thermo-mécanique et microstructurale de l'acier Z10MC18-8. Application au forgeage des frettes," l'Ecole des Mines de Paris, (1995).
- [14] G. Trapied, "Mise en forme du cuivre et des alliages de cuivre," *Technique de l'ingénieur M 660*, (1995).
- [15] R. B. J. Kesler, H. chauvel, "Génie des matériaux, Edition Casteila," (2001).
- [16] J. MOLIMARD, "Etude expérimentale du régime de lubrifiant en filme mince-application aux fluides de laminage," in *Thèse INSA de Lyon*, (1999).

- [17] J. P. L. R. N. YU, "Tréfilage des fils cuivreux ultra-fins," *Technique de l'ingénieur M 646*, (2000).
- [18] C. Levrau, "compréhension et modélisation des mécanismes de lubrification lors du tréfilage des aciers inoxydables avec les savons secs," (2006).
- [19] P. J. Cunat, "Acier inoxydable, Fabrication," *Technique de l'ingénieur M 454*, (2000).
- [20] D. François, "Essais mécaniques des métaux, Essais de dureté," *Techniques de l'Ingénieur M 123*, (1995).
- [21] A. Boudilmi, "étude théorique et expérimentale des essais de dureté pour matériaux massifs et revêtus," Université M Boudiaf de M'sila, (2008).
- [22] A. P. G. Doubenski, "Resistance des matériaux," université d'Annaba, (1977).
- [23] D. François, "Essais mécaniques des métaux, Détermination des lois de comportement," *Technique de l'ingénieur M120*, (1996).
- [24] G. E. Dieter, *Mechanical Metallurgy*, Student Edition McGraw-Hill ed, (1976).
- [25] A. S. O. du Roure, A. Buguin, "Ladoux, Force mapping in epithelial cell migration," in *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, (2005).
- [26] A. Nadai, *Theory of flow and fracture of solids*, Edition McGraw-Hill ed, (1950).

Résumé

L'objectif de ce travail de recherche était l'étude des fils de cuivre tréfilés. L'étude consistait à connaître le comportement au fluage de ces fils lors de plusieurs essais. Un appareil d'essai de fluage a été conçu pour aboutir à notre objectif. Des techniques complémentaires ont été aussi utilisées telle que la microscopie optique, la diffraction des rayons X, le MEB, la microdureté et l'essai de traction. A travers cette étude, le mécanisme et les conditions de rupture par fluage des fils de cuivre sont déterminés.